UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM EM CIÊNCIAS DA TERRA E DO AMBIENTE

Doutorado em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente

**Tese de Doutorado**

# Análise Espaço Temporal no Setor Energético, Metais Preciosos e Agropecuário

Apresentada por: Thiago Pires Santana
Orientador: Gilney Figueira Zebende

Outubro de 2025

Thiago Pires Santana

# Análise Espaço Temporal no Setor Energético, Metais Preciosos e Agropecuário

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente, Curso de Doutorado em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente da UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA, como requisito parcial para a obtenção do título de **Doutor em Ciências Ambientais**.

Área de conhecimento: Estudos Ambientais e Geotecnologias

Orientador: Prof. Dr. Gilney Figueira Zebende
*UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA*

Co-orientador: Prof. Dr. Aloísio Machado da Silva Filho
*UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA*

Co-orientador: Prof. Dr. Rui Manuel Teixeira Santos Dias
*INSTITUTO POLITÉCNICO DE SETÚBAL*

Feira de Santana, BA
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA
2025

Ficha Catalográfica - Biblioteca Central Julieta Carteado - UEFS

Santana, Thiago Pires
S223a Análise espaço temporal no setor energético, metais preciosos e agropecuário / Thiago Pires Santana . – 2025.
239 f.: il.

Orientador: Gilney Figueira Zebende
Coorientador: Aloísio Machado da Silva Filho, Rui Manuel Teixeira Santos Dias
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Feira de Santana, Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente, Feira de Santana, 2025.

1. Geotecnologias. 2. Econofísica. 3. Séries temporais. 4. Índices financeiros. 5. Commodities . I. Zebende, Gilney Figueira, orient. II. Silva Filho, Aloísio Machado da, coorient. III. Dias, Rui Manuel Teixeira Santos, coorient. IV. Universidade Estadual de Feira de Santana. V. Título.

CDU 504.03

Daniela Machado Sampaio Costa - Bibliotecária - CRB-5/2077

# UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA

Programa de Pós-graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente

Doutorado em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente

A Banca Examinadora, constituída pelos professores listados abaixo, leu e recomenda a aprovação da Tese de Doutorado, intitulada "Análise Espaço Temporal no Setor Energético, Metais Preciosos e Agropecuário", apresentada no dia 17 de outubro de 2025, como requisito parcial para a obtenção do título de **Doutor em Ciências Ambientais**.

GILNEY FIGUEIRA ZEBENDE:02239627751 Digitally signed by GILNEY FIGUEIRA ZEBENDE:02239627751 Date: 2025.10.18 10:15:39 -03'00'

Orientador: _____

Prof. Dr. Gilney Figueira Zebende

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA

gov.br Documento assinado digitalmente ALOISIO MACHADO DA SILVA FILHO Data: 18/10/2025 12:21:32-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br

Co-Orientador: _____

Prof. Dr. Aloísio Machado da Silva Filho

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA

Assinado por: Rui Manuel Teixeira Santos Dias Identificação: BI09045028 Data: 2025-10-21 às 17:41:37

Co-Orientador: _____

Prof. Dr. Rui Manuel Teixeira Santos Dias

INSTITUTO POLITÉCNICO DE SETÚBAL

gov.br Documento assinado digitalmente CARLOS ALBERTO RODRIGUES Data: 19/10/2025 16:31:42-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br

Membro interno da Banca: _____

Prof. Dr. Carlos Alberto Rodrigues

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA

gov.br Documento assinado digitalmente EVERALDO FREITAS GUEDES Data: 18/10/2025 22:51:56-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br

Membro externo da Banca: _____

Prof. Dr. Everaldo Freitas Guedes

FUNDAÇÃO OSVALDO CRUZ

JADER DA SILVA JALE:92023924391 Assinado de forma digital por JADER DA SILVA JALE:92023924391 Dados: 2025.10.18 10:58:03 -03'00'

Membro externo da Banca: _____

Prof. Dr. Jader da Silva Jale

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNANBUCO

gov.br Documento assinado digitalmente RONALDO PESENTE Data: 19/10/2025 08:08:49-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br

Membro externo da Banca: _____

Prof. Dr. Ronaldo Pesente

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

Dedico este trabalho aos
amigos e à família.

# Agradecimentos

A conclusão desta tese representa um marco importante em minha trajetória acadêmica e pessoal, e não seria possível sem o apoio e incentivo de muitas pessoas, às quais expresso minha mais profunda gratidão.

Primeiramente, agradeço ao meu orientador, **Gilney Figueira Zebende** e aos meus co-orientadores **Aloísio Machado da Silva Filho e Rui Manuel Teixeira Santos Dias**, pelo suporte, paciência e orientação ao longo deste percurso. Seus ensinamentos e incentivos foram fundamentais para a concretização deste trabalho. Além disso, a convivência com estes trouxe-me grande aprendizagem pessoal e profissional, apresentando-se como referências a seguir.

Aos meus familiares, em especial a minha companheira **Pricila Oliveira de Araújo** e as minhas filhas, **Elisa Araújo Pires Santana e Mariana Araújo Pires Santana**, por todo amor, apoio incondicional e compreensão durante essa jornada desafiadora.

Aos meus colaboradores, colegas e amigos que compartilharam conhecimentos, ideias e momentos de aprendizado, seja com palavras de apoio, discussões produtivas ou momentos de descontração que tornaram o caminho mais leve e enriquecedor. Agradeço a estes todo apoio técnico e científico que contribuíram significativamente para este trabalho.

Por fim, agradeço à Universidade Estadual de Feira de Santana, Instituto Politécnico de Setúbal e ao Programa de Pós Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente, que possibilitaram a realização desta pesquisa, seja por meio de suporte financeiro, infraestrutura ou acesso a recursos essenciais. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior do Brasil (CAPES), código de Financiamento 001.

À todos, meu sincero muito obrigado!

Feira de Santana, Bahia, Brasil — Thiago Pires Santana

17 de Outubro de 2025

# Resumo

As tecnologias têm tornado o mundo cada vez mais conectado, permitindo a troca de informação simultânea entre espaços geograficamente distantes. Atualmente, as estruturas socioeconômicas e ambientais são estudadas de forma integrada, levando em consideração a sua interação, adaptação e evolução, uma abordagem metodológica fundamentada na análise de sistemas de complexos. O setor econômico, por exemplo, apresenta uma relação de interação entre vários outros agentes, sendo capaz de gerar interferências positivas e/ou negativas em suas dinâmicas, como ocorre no setor de energético, agropecuário e metais preciosos. Neste contexto, o objetivo geral dessa pesquisa é mapear a dinâmica interativa e temporal das séries de índices financeiros do setor energético, metais preciosos e agropecuário. Para alcançar esse objetivo, inicialmente investigamos o cenário científico relacionado ao tema da pesquisa por meio de uma análise bibliométrica. Em seguida, realizamos a caracterização das séries temporais quanto à presença de memória de longo prazo, interdependência e efeito de contágio, a partir do expoente $\alpha_{DFA}$ e dos coeficientes $\rho_{DCCA}$ e $\Delta\rho_{DCCA}$ métricas amplamente empregadas no campo da Econofísica para a análise de dependência e correlação entre séries não estacionŕias. Trabalhamos com os índices de petróleo, ouro, prata, milho, boi gordo, soja e empresas do segmento de energia limpa de modo compreender a dinâmica das séries e seus mercados. Os resultados estão dispostos no Capítulo 3 em forma de artigo científico. Reconhecemos, nos estudos bibliométricos, que a Econofísica tem crescido como área científica e que a análise de interdependência e contágio em *commodities* agropecuárias tem sido estudadas na perspectiva da sustentabilidade e transição energética. Observamos que a pandemia da COVID-19 interferiu na dinâmica de preços do petróleo e metais preciosos, com maior intensidade entre os índices de petróleo, além disso, foi identificado contágio positivo no cruzamento das *commodities* analisadas especialmente entre metais e petróleo. No setor agropecuário observamos persistência na maioria dos índices, com destaque para a *commodity* de boi gordo, enquanto a *commodity* de milho apresentou esse padrão somente para pequenas escalas temporais. Nossos achados indicaram que a maioria das empresas do segmento de energia limpa apresentam relações de interdependência, caracterizadas pela formação de grupos com maior conectividade e elementos que exercem maior interação nestes grupos. Com base nos resultados, concluímos que a ciência tem se tornado cada vez mais interdisciplinar, com foco crescente no equilíbrio sustentável. O atual processo de globalização reconhece que eventos locais exerçem influência nas dinâmicas globais e possibilita a diversificação e mitigação de crises sistêmicas, em que é possível amenizar as dificuldades por grandes, médios e pequenos produtores/instituições. Assim, torna-se possível compreender as interações econômicas e como elas interferem em cada setor.

**Palavras-Chave:** Séries temporais; Interdependência; Efeito de Contágio; *Commodities*; $\alpha_{DFA}$; $\rho_{DCCA}$.

# Abstract

The technologies have made the world increasingly interconnected, enabling the simultaneous exchange of information between geographically distant spaces. Currently, socioeconomic and environmental structures are studied in an integrated manner, taking into account their interaction, adaptation, and evolution, a methodological approach grounded in the analysis of complex systems. The economic sector, for instance, exhibits an interactive relationship among various other agents, being capable of generating positive and/or negative interferences in their dynamics, as occurs in the energy, agricultural, and precious metals sectors. In this context, the main objective of this research is to map the interactive and temporal dynamics of financial index series in the energy, precious metals, and agricultural sectors. To achieve this goal, we initially investigate the scientific landscape related to the research topic through a bibliometric analysis. Subsequently, we performed the characterization of the time series regarding the presence of long-range dependence, interdependence, and contagion effects, based on the exponent $\alpha_{DFA}$ and the coefficients $\rho_{DCCA}$ and $\Delta\rho_{DCCA}$ metrics widely employed in the field of Econophysics for the analysis of dependence and correlation among non-stationary series. We worked with the indices of oil, gold, silver, corn, live cattle, soybeans, and companies in the clean energy sector in order to understand the dynamics of the series and their respective markets. The results are presented in Chapter 3 in the form of a scientific article. Through bibliometric studies, we recognize that Econophysics has grown as a scientific field, and that the analysis of interdependence and contagion in agricultural commodities has been approached from the perspective of sustainability and energy transition. We observed that the COVID-19 pandemic affected the price dynamics of oil and precious metals, with greater intensity among oil indices. Furthermore, positive contagion was identified across the analyzed *commodities*, especially between metals and oil. In the agricultural sector, we observed persistence in most indices, with emphasis on the commodity of live cattle, while the commodity of corn exhibited this pattern only at small temporal scales. Our findings indicated that most companies in the clean energy segment exhibit interdependent relationships, characterized by the formation of groups with higher connectivity and elements that exert greater interaction within these groups. Based on the results, we conclude that science has become increasingly interdisciplinary, with a growing focus on sustainable balance. The current process of globalization recognizes that local events exert influence on global dynamics and enables the diversification and mitigation of systemic crises, allowing large, medium, and small producers or institutions to alleviate difficulties. Thus, it becomes possible to understand economic interactions and how they affect each sector.

**Keywords:** Time series; Interdependence; Contagion Effect; *Commodities*; $\alpha_{DFA}$; $\rho_{DCCA}$.

# Sumário

# Lista de Tabelas

# Lista de Figuras

# Lista de Siglas

| | |
|---|---|
| UEFS ..... | Universidade Estadual de Feira de Santana |
| PPGM ..... | Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente |
| CAPES ..... | Coordenação de Aprefeiçoamento de Pessoal de Nível Superior |
| DCCA ..... | *Detrended Cross-Correlation Analysis* |
| DFA ..... | *Detrended Fluctuation Analysis* |
| COVID-19 .. | *Coronavirus disease 2019* |
| WTI ..... | *West Texas Intermediate* |
| Brent ..... | *Brent Crude oil benchmark* |
| DJI ..... | *Dow Jones Industrial* |
| S&P ..... | *Standard & Poor's* |

Capítulo Um

# Introdução

## 1.1 Considerações iniciais

O desenvolvimento tecnológico, em especial com o surgimento da internet, tem permitido que o mundo se torne mais conectado, facilitando a troca de informações, culturas, práticas, experiências e tecnologias (HAYTHORNTHWAITE, 2005). O aumento da interação imposta pelo desenvolvimento tem provocado uma aceleração das mudanças na sociedade o que, por sua vez, implica em uma maior fluidez nos processos de adaptação e transformação (ALVIN, 1973). Atualmente, é possível realizar a comercialização e negociar ativos econômicos e financeiros [1] em todo o mundo em poucos minutos, sem sair de casa.

Esta Tese parte da premissa de que as estruturas sociais, políticas, econômicas, ambientais e produtivas, entre outras, possuem capacidade de interação e exercem simultaneamente interferências em uma perspectiva local, global, não linear e complexa. O viés adotado parte da noção de que um sistema complexo, seja ele econômico, financeiro, produtivo, ambiental ou social, é formado por múltiplos agentes que interagem entre si, autorregulando-se e se auto-organizam, ao mesmo tempo, que apresentam propriedades coletivas emergentes, que não podem ser identificadas e generalizadas mediante a análise isolada de uma unidade ou partição do sistema (ROSARIO; EUGENE, 1999; LADYMAN; LAMBERT; WIESNER, 2013; BOCCARA, 2004).

A fluidez e a conectividade nas operações comerciais (regional, nacional e internacional) têm viabilizado grandes possibilidades de diversificação, investimentos, coprodução, melhores condições para distribuição de produtos e alimentos. No entanto, esse processo de integração também pode gerar problemas de natureza social, econômica e ambiental (PAITAN; VERBURG, 2019). Crises econômicas e financeiras iniciadas em um agente do sistema pode desencadear de crises em outros agentes, consequentemente, ao desemprego, ao aumento nos preços dos alimentos, à fome, ao desabastecimento e/ou à exploração inadequada do solo, de rios e mares (GUEDES et al., 2019; PAITAN; VERBURG, 2019; ZEBENDE; DIAS; AGUIAR, 2022; SANTANA et al., 2023a).

[1] Embora pareçam a mesma coisa, existem diferenças entre indicadores econômicos e financeiros. O primeiro, econômico, demonstra os resultados em relação à produção e comercialização de produtos, serviços, movimentação financeira, entre outros; um sentido mais amplo. Já o financeiro foca especificamente na geração de caixa, isso é, na quantidade de dinheiro que é gerado. Neste trabalho não buscamos fazer distinção entre esses conceitos, pois a análise financeira é entendida, aqui, como uma ramificação da econômica, mas que possuem implicações direta com outras áreas da Economia e se entrelaçam.

No contexto da economia, existe uma área específica que estuda as interações dinâmicas entre agentes econômicos, surgida em meados da década de 1990. Esta nova área, denominada Econofísica, é definida como uma análise do sistema econômico a partir da noção de sistemas complexos, uma abordagem que se apropria de conceitos da Física para interpretar fenômenos econômicos. Essa perspectiva é abordada técnicas de análise de correlação como maneira de estudar as interações entre os agentes de um sistema (ROSARIO; EUGENE, 1999).

A compreensão das dinâmicas de correlação entre índices econômicos e financeiros possibilita analisar os movimentos e comovimentos entre mercados (GUEDES, 2019), permitindo antecipar flutuações de índices e transmissão de efeitos indesejados pela observação do comportamento interativo entre os agentes. A partir da análise de correlação, como é evidenciado em inúmeros estudos é discutido os conceitos econômicos de volatilidade, interdependência e contágio (GUEDES, 2019; SANTANA et al., 2023a; KRISTOUFEK; FERREIRA, 2018; ZEBENDE; DIAS; AGUIAR, 2022; YUAN; SUN; LU, 2021; FENG; LIU; YANG, 2021).

Existem diversos métodos para analisar correlação cruzada em séries temporais, como: coeficiente de Pearson (PEARSON, 1895), coeficiente de Spearman (SPEARMAN, 1987), teste de correlação de Kendall (KENDALL, 1938), coeficiente $\rho_{DCCA}$ (*DCCA-Detrended Cross Correlation Analisysext*) (ZEBENDE, 2011), $\Delta\rho_{DCCA}$ (SILVA et al., 2016; GUEDES et al., 2017; GUEDES et al., 2018a), $DMC_x^2$ (*Detrended Multiple Cross-Correlation Coefficient*)(ZEBENDE; FILHO, 2018; FILHO et al., 2021). E autocorrelação como expoente de Hurst (HURST, 1951). Em termos amplos, as métricas admitem pré-requisitos e suposições que devem ser admitidos para obtenção de resultados adequados e coerentes para os tipos de dados. Nesta Tese, utilizamos o expoente $\alpha_{DFA}$, e os coeficientes $\rho_{DCCA}$ e $\Delta\rho_{DCCA}$, pois permitem a avaliação da série temporal estacionárias e não estacionárias em diferentes escalas temporais na presença ou não de tendência.

Os dados utilizados nesta investigação são índices financeiros de *commodities*, como ouro, prata, petróleo, milho, soja, boi gordo e instituições financeiras do segmento de energia limpa. Segundo a literatura, séries temporais consistem em um conjunto de dados arranjados sequencialmente de forma cronológica e são adequados para estudos econômicos de natureza empírica, permitindo compreensão e descrição do comportamento para tomada de decisão e previsão de movimentos futuros (MORETTIN; TOLOI, 2004; MORETTIN; TOLOI, 2020; SOARES, 2020).

Séries financeiras, em geral, admitem características não estacionárias (MORETTIN; TOLOI, 2020; MORETTIN; TOLOI, 2004; SOARES, 2020; GUEDES, 2019), ou seja, suas medidas descritivas variam ao longo do tempo. Deste modo, esta Tese tem como base os métodos e métricas definidos por Peng et al. (1994), Podobnik e Stanley (2008), Ze-

bende (2011) e Silva et al. (2016), que usualmente tem sido explorado para análises dessa natureza.

Os principais conceitos utilizados para este trabalho estão descritos no Capítulo 2 que aborda as noções de: sistemas simples e complexos, classificação e propriedades; volatilidade, interdependência e efeito de contágio na perspectiva da Econofísica; séries temporais, conceitos básicos, processos estocásticos, método DFA e DCCA, expoente $\alpha_{DFA}$, coeficiente $\rho_{DCCA}$ e $\Delta\rho_{DCCA}$.

## *1.2 Problema de investigação*

**Questão de investigação**: Qual o tipo e o nível de interação das séries temporais do setor energético, metais preciosos e agropecuários?

## *1.3 Objetivos*

### Objetivo Geral

Mapear a dinâmica interativa e temporal das séries de índices financeiros do setor energético, metais preciosos e agropecuário.

### Objetivos específicos

- Desenvolver um estudo bibliométrico sobre a produção literária associada a Econofísica e interdependência e efeito de contágio em *commodities* agropecuárias, identificando as *commodities* mais estudadas e os métodos aplicados;
- Estimar os níveis de correlação cruzada entre os índices do petróleo, metais preciosos e o impacto da COVID-19;
- Quantificar e qualidicar o nível de correlação nos mercados regionais das *commodities* de boi gordo, soja e milho do estado da Bahia-Brasil;
- Caracterizar a dinâmica de interação dos índices de mercado de empresas do segmento de energia limpa.

## 1.4 Justificativa

Atualmente, os setores da sociedade estão cada vez mais interligados. Não é possível imaginar uma sociedade que pense no sistema econômico dissociado das questões sociais e ambientais, mesmo que se estabeleçam valores não-equitativos para esses setores.

Diante da realidade supracitada, tornam-se necessárias pesquisas que avaliem as conexões econômicas existentes no setor agropecuário, energia e metais preciosos, haja vista a sua relevância nos aspectos fundamentais da sobrevivência: alimentação, transporte, emprego, sustentabilidade, entre outros que podem ser identificados nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) ver ⟨https://brasil.un.org/pt-br/sdgs⟩.

Sabemos que o comportamento de um sistema complexo é multifatorial, isto é, a dinâmica de um agente está associada a outros e as perturbações ocorridas em um elemento repercutem em todo sistema, por exemplo, as crise econômicas geram impactos sociais, ambientais tanto local e quanto globalmente (GRASS et al., 2019; BRONDIZIO; OSTROM; YOUNG, 2009; GUEDES, 2019; HALL; JORDAAN; FRISK, 2012). Em geral, fontes de energia (com destaque ao petróleo), *commodities* agrícolas e metais preciosos (sobre tudo o ouro) relacionam-se diretamente. Assim a volatilidade nos preços dos combustíveis, como ocorrido da crise provocada pela COVID-19, implica redução da produção industrial, flutuação nos preços dos alimentos e migração de capital financeiro para mercados mais estáveis (como metais preciosos) (REBOREDO, 2012; SANTANA et al., 2023a), entre outras repercussões. Essas flutuações são mais fortes, principalmente nos países em desenvolvimento com pouca produção doméstica e dependentes internacionalmente (ABBOTT; BATTISTI, 2011).

Apesar de reconhecida notoriedade do tema, como pode ser evidenciada em alguns estudos sobre essa temática (ver referências (BOZKURT, 2025; ARFAOUI; ROUBAUD; NAEEM, 2025; SANTANA et al., 2023a)), não se reconhecem na literatura, até o momento, estudos regionais, como no estado da Bahia. Além disso, a dinâmica temporal dos índices econômicos demanda monitoramento contínuo, especialmente quando se tem a inserção de um novos agentes na interação complexa do mercado financeiro e econômico, como pode ser visto no desenvolvimento das fontes de energia renováveis e limpas ou mudanças políticas, crises sanitárias, entre outras (BOZKURT, 2025; ARFAOUI; ROUBAUD; NAEEM, 2025; FERREIRA; LOURES, 2020; BALCERZAK et al., 2025; SANTANA et al., 2023a).

Considerando os argumentos mencionados até aqui, é evidente a necessidade da produção de estudos que ajudem a compreender a complexidade socioeconômica e ambiental entre os agentes econômicos e financeiros, que possibilite uma análise espacial e temporal levando em conta alguns aspectos como: escala temporal da análise, mensuração do efeito contágio

e da interdependência.

Espera-se que este trabalho contribua para estruturação e gerenciamento de políticas públicas que objetivem reduzir os impactos causados por crises externas e internas, prevenção de riscos, melhores possibilidade de investimentos, diversificação, subsistência, produtividade e desenvolvimento, em especial, para o pequeno e médio produtor.

## *1.5 Estrutura da Tese*

Para atender os objetivos da pesquisa, esta Tese está organizada da seguinte forma, a contar da introdução, seguida da fundamentação teórica, produções científicas e considerações finais.

Na introdução mostramos o eixo científico sob o qual se contextualiza a problemática da pesquisa e apresentamos a questão de investigação, objetivos e perspectivas metodológicas.

No referencial teórico, Capítulo 2, apresentamos os fundamentos e conceitos que amparam este estudo e estão organizados em eixos temáticos: sistemas, volatilidade, interdependência, efeito de contágio no contexto da Econofísica e séries temporais.

As produção científicas, Capítulo 3, são os resultados apresentados em formato de artigo publicado ou submetido. Nestes textos são identificados elementos inovadores e ainda pouco explorados que aparam as considerações finais.

Por fim, no Capítulo 4 apresentamos as considerações finais.

Capítulo Dois

# Fundamentação Teórica

Sistemas Complexos analisam eventos ou fenômenos numa perspectiva global, dinâmica e interativa. As ideias principais giram em torno da compreensão de fenômenos emergentes, auto-organização, interdependência, padrões individuais e coletivos, entre outras propriedades. Esta perspectiva combina conceitos de várias áreas científicas para analisar, compreender e modelar um fenômeno ou sistema (ROSARIO; EUGENE, 1999; LADYMAN; LAMBERT; WIESNER, 2013; SZOSTAK, 2011; BOCCARA, 2004).

Os fenômenos financeiros e econômicos têm sido analisados por essa perspectiva e tem apresentado diversos resultados e contribuições inovadoras nessa área. O estudo desses fenômenos a partir da teoria dos Sistemas Complexos tem sido identificada como uma nova área científica, "Econofísica", que agrega conceitos da Física para interpretação financeira/econômica, explorando problemas como: autoafinidade, memória, interdependência, efeito de contágio e suas implicações na interações socioeconômicas (ROSARIO; EUGENE, 1999; BIELINSKYI et al., 2021b; GUEDES et al., 2019; QUINTINO; BURNQUIST; FERREIRA, 2021).

A interação/interdependência/contágio é explorada em diversos contextos econômicos: mercados globais e locais, mercado de energias tradicionais, limpas e renováveis, *commodities* agropecuárias, metais preciosos, transmissão de flutuação, crises, entre outros (SANTANA et al., 2023a; SANTANA et al., 2024; ARFAOUI; ROUBAUD; NAEEM, 2025; FASANYA; ODUDU, 2020; BOZKURT, 2025). Para medir essas interações, a análise de correlação é um método utilizado para quantificar as relações entre os elementos de um sistema, buscando compreender comportamentos e como eles se propagam e impactam o sistema.

A seguir são apresentados os conceitos que auxiliarão na compreensão dos resultados da Tese. As seções serão organizadas pelos seguintes tópicos: Sistemas, Sistemas Complexos e propriedades, Econofísica, Interdependência, Contágio e Séries temporais.

## *2.1 Sistemas*

A teoria de sistemas oferece uma abordagem holística para a compreensão da realidade, transcendendo as limitações das visões fragmentadas e reducionistas (BERTALANFFY, 1968). Ao invés de analisar os fenômenos isoladamente, a perspectiva sistêmica busca

identificar as interconexões e interdependências que moldam o comportamento dos sistemas em sua totalidade.

Um sistema pode ser definido como um conjunto de elementos interconectados que interagem entre si e apresentam propriedades individuais, coletivas e relação de causa e efeito (CAPRA, 1996; BERTALANFFY, 1968). Interpretar e estudar os fenômenos científicos nesta perspectiva integrativa pode explicar o comportamento divergente ou convergente de uma variável em diferentes aspectos. Essa abordagem não apenas facilita a previsão de eventos naturais e sociais, mas também contribui para o desenvolvimento de soluções inovadoras para desafios globais (CAPRA, 1996; CHECKLAND, 1981).

Ademais, essa abordagem reconhece a subjetividade inerente à percepção dos sistemas e a necessidade de considerar diferentes perspectivas. Eles podem ser categorizados como físicos, conceituais e sociais e classificados como simples e complexos. Podemos identificar alguns tipos de sistemas: financeiros, respiratório, ecossistema, operacional, educacional, entre outros (WILSON, 1991; CHECKLAND, 1981; CAPRA, 1996; BERTALANFFY, 1968).

### *Categorias de Sistemas*

Os sistemas físicos são aqueles que existem no mundo material e podem ser observados e medidos diretamente (BOWKER; STAR, 2000; HORVÁTH, 2015). Eles são compostos por elementos tangíveis, como máquinas, equipamentos e estruturas físicas. Além disso, são determinados pelas leis da natureza e podem ser definidas por equações matemáticas (BOWKER; STAR, 2000; HORVÁTH, 2015).

Sistemas conceituais, por outro lado, são abstratos e existem no domínio das ideias e do pensamento, eles são compostos por conceitos, teorias e modelos que ajudam a entender e explicar fenômenos (CHECKLAND, 1981). Para Checkland (1981) sistemas conceituais são recursos potenciais para compreender problemas complexos que evoluem ao longo do tempo, variando de um simples como o diagrama de Venn a um modelo robusto de simulação de mudanças climáticas. A Econofísica, por exemplo, é a área do conhecimento que aplica os conceitos de sistemas a partir de inúmeros métodos e técnicas para análise de fenômenos ou sistemas econômicos (ROSARIO; EUGENE, 1999).

Sistemas sociais são compostos por seres humanos e suas interações, eles incluem instituições, organizações e comunidades que funcionam através de normas, valores e regras sociais (LUHMANN, 1995), como uma família, onde os membros interagem e se influenciam mutuamente. Adicionalmente podemos identificar os sistemas políticos e redes sociais em que existe uma estrutura de governança, tomada de decisão, interações física

e digital entre indivíduos e grupos.

### *Classificação de Sistemas*

Sistemas simples são aqueles que possuem poucos componentes e interações previsíveis e são caracterizados por uma dinâmica linear, pela ausência de emergência e o comportamento das partes do sistema podem ser expandido para o todo (SIMON, 1962).

Já os Sistemas Complexos são compostos por muitos elementos interconectados, cujas interações dão origem a propriedades emergentes que não podem ser previstas apenas pela análise individual dos componentes, nesta classificação incluímos os ecossistemas, economias e redes sociais (BOCCARA, 2004; ROSARIO; EUGENE, 1999; SIMON, 1962; LADYMAN; LAMBERT; WIESNER, 2013). Para Holland (1995), Morin (2005) e Boccara (2004) um sistema complexo é um conjunto de muitos agentes interconectados que exibem um comportamento global emergente, não linear, adaptativo, não imposto por um controlador central, mas resultante das interações entre os agentes, onde pequenas interferências podem gerar grandes impactos. Os elementos de um sistema podem ser de diversas naturezas, como: revoada de pássaros, índices de preço de uma cadeia produtiva, peixes de um cardume ou a estrutura de galhos de uma árvore.

A Fig. 2.1 apresenta um sistema complexo a partir da estrutura de uma árvore. Tronco, galhos, folhas e raízes formam uma rede de comunicação e troca de recursos, ajustando-se continuamente às variações ambientais. A fotossíntese, a absorção de água e nutrientes são processos interdependentes que garantem a sobrevivência e reprodução da árvore.

A complexidade do sistema arbóreo reside na sua capacidade de auto-organização e resiliência. A estrutura ramificada dos galhos maximiza a exposição das folhas à luz solar. A resposta da árvore a estímulos externos, como luz, gravidade, vento e mobilidade do solo é uma interação múltipla na dinâmica de movimentação da sua estrutura.

A distinção entre sistemas simples e complexos é fundamental na escolha de metodologias adequadas para análise e intervenção. Para Morin (2005) a complexidade é uma forma de pensar que reconhece a interação entre os agentes do sistema e a perspectiva multidisciplinar dos fenômenos.

Figura 2.1: Sistema complexo representado por uma árvore.

Fonte: Elaboração própria, arquivo pessoal do autor.

### *Propriedades de Sistemas Complexos*

Considerando a natureza interativa e outras características que define um Sistema Complexo, algumas propriedades podem ser identificadas para estudo desse tipo de sistema (BOCCARA, 2004; ROSARIO; EUGENE, 1999; SIMON, 1962; LADYMAN; LAMBERT; WIESNER, 2013; MORIN, 2005; HOLLAND, 1995; BAK, 1996; GELL-MANN, 1994).

- Interação Dinâmica e Múltipla: os elementos dentro de um sistema complexo interagem constantemente de maneira dinâmica e multifacetada, formando redes de dependências. Essas interações podem ocorrer de forma direta ou indireta, ou seja, ocorrem entre elementos do próprio sistema ou ambiente externo. A dinâmica dessas interações ao longo do tempo pode levar a comportamentos imprevisíveis e emergentes;

- Evolução e Adaptação: Sistemas Complexos têm a capacidade de evoluir e se adaptar ao longo do tempo. Isso pode ocorrer através de mecanismos como seleção natural, aprendizado, ou mudanças estruturais em resposta a estímulos externos. A adaptação é crucial para a sobrevivência e funcionalidade do sistema em ambientes mutáveis. Essa adaptação pode ser observada em ecossistemas, sociedades e até em sistemas computacionais, que ajustam seus padrões de funcionamento com base em novas informações;

- Interação de longo Alcance: pequenas mudanças durante o desenvolvimento ou alteração nas condições iniciais em um sistema complexo podem gerar efeitos amplos e inesperados. Isso é frequentemente observado em sistemas onde a conectividade é forte entre os agentes;

- Não Linearidade: as relações de causa e efeito dentro de um sistema complexo frequentemente não seguem padrões lineares. Isto é, um pequeno estímulo pode gerar grandes mudanças, enquanto estímulos intensos podem ter pouco impacto, ou ainda, um mesmo estimo pode ter efeitos diferentes e agentes distintos. Isso torna a previsão do comportamento do sistema extremamente difícil;

- Caos: mínimas variações nas condições iniciais, não linearidade e interações dinâmicas resultam em trajetórias completamente diferentes ao longo do tempo. Isso significa que, mesmo com um conhecimento quase completo do estado atual do sistema, prever seu comportamento de médio e longo prazo pode ser praticamente impossível além de um certo horizonte de tempo;

- Sistemas Abertos: a maioria dos Sistemas Complexos não são isolados; eles interagem constantemente com o ambiente externo, trocando matéria, energia ou informações. Essa troca é essencial para a manutenção e evolução do sistema;

- Múltiplas Escalas: os Sistemas Complexos operam em diferentes escalas de tempo e espaço simultaneamente. Fenômenos em uma escala podem influenciar e serem influenciados por fenômenos em outras escalas, criando uma teia de interdependências. Uma crise econômica em uma região pode gerar influência no mercado estatal, nacional e internacional;

- Emergência: propriedades emergentes são características do sistema que não podem ser previstas apenas pela análise de seus componentes individuais. Elas surgem das interações e relações entre os elementos do sistema. A emergência é uma das marcas registradas dos Sistemas Complexos;

- Memória: o histórico de interações de um sistema pode influenciar seu comportamento futuro, exibir memória. Isso pode ocorrer através de mecanismos como aprendizagem ou retenção de informações em estruturas internas, e são capazes de manter propriedades a curto, médio e longo prazo;

- *Feedback*: os Sistemas Complexos possuem mecanismos de retroalimentação que podem amplificar ou estabilizar mudanças. *Feedbacks* positivos pode levar ao crescimento exponencial ou alterações abruptas, enquanto os negativos tendem a estabilizar o sistema. A interação entre diferentes tipos de feedback é essencial para a regulação do sistema.

As propriedades dos Sistemas Complexos, anteriormente mencionadas, interagem entre si tornando a modelagem de Sistemas Complexos um campo rico e desafiador. A construção de modelos para estudos de Sistemas Complexos, geralmente é feita por meio de simulações computacionais, pois os métodos analíticos são limitados (BOCCARA, 2004). De acordo com Boccara (2004), a modelagem de Sistemas Complexos deve ser feita a partir de equações diferenciais ou de recorrência em que a teoria do caos pode oferecer ferramentas importantes para compreender a dinâmica dos Sistemas Complexos.

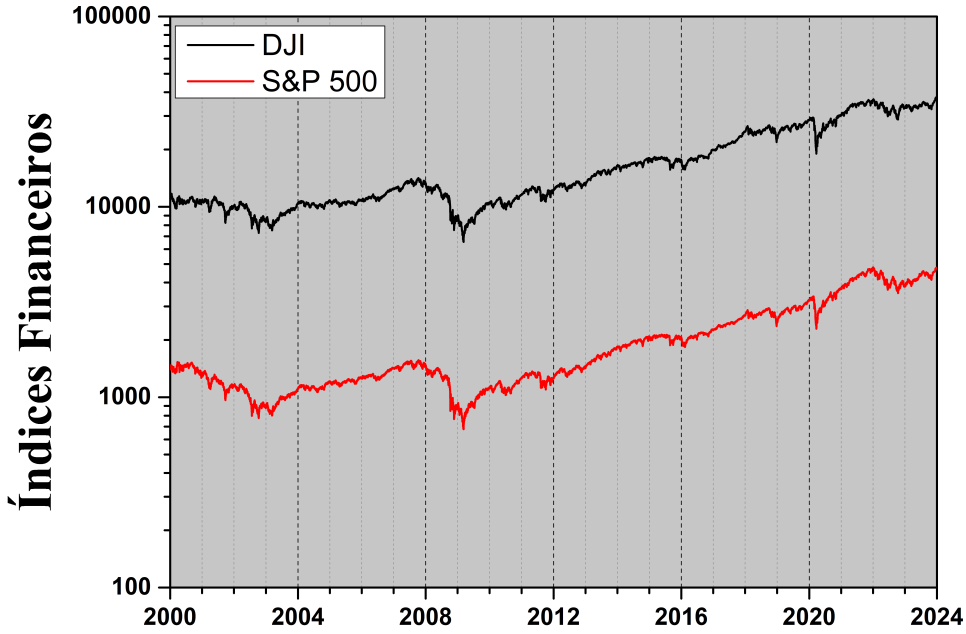
É possível, pela Fig. 2.1, identificar algumas destas propriedades.

## 2.2 Volatilidade, interdependência e efeito de contágio no contexto da Econofísica

Partindo do conceito de Econofísica introduzido por Rosario e Eugene (1999) que define como aplicação de métodos estatísticos e físicos para analisar mercados financeiros, contexto em que faremos nossa análise. Os autores exploram a interseção entre essas áreas do conhecimento, abordando a complexidade dos sistemas financeiros e a dinâmica de mercado sob a ótica da Física. Adicionalmente, essa interseção fornece uma base matemática e empírica para a análise de séries temporais financeiras, enfatizando a importância das correlações entre gentes econômicos e os fenômenos emergentes no comportamento coletivo do mercado (ROSARIO; EUGENE, 1999; GUEDES et al., 2019; RODRIGUES et al., 2024).

Essa abordagem se destaca por fornecer um viés inovador para a análise financeira, utilizando ferramentas da Física estatística para compreender a complexidade dos mercados. Ao explorar conceitos como correlação, volatilidade, interdependência e contágio, a Econofísica apresenta uma perspectiva quantitativa robusta para estudar o comportamento coletivo dos ativos financeiros, contribuindo significativamente para o campo da economia e modelagem do risco sistêmico, de maneira a ampliar a eficácia da diversificação, compreender a frequência das flutuações de preços (volatilidade), aprimorar a gestão de risco e a formulação de estratégias de investimento do mercado como um todo (ROSARIO; EUGENE, 1999; FERREIRA; PEREIRA; PEREIRA, 2020; BIELINSKYI et al., 2021a; GUEDES et al., 2019).

Figura 2.2: Índices Financeiros da S&P 500 e Dow Jones - DJI.




Fonte: Elaboração própria.

Na Fig. 2.2 é possível identificar a dinâmica dos índices no período de 2000 a 2024 e perceber a volatilidade destes, com destaque a flutuação na crise de 2008 (Subprime) e 2020 (COVID-19).

Mesmo os índices DJI e S&P 500 admitindo medidas diferentes percebe-se que suas seus gráficos tem contornos semelhantes. Isso mostra a possibilidade de correlação entre eles.

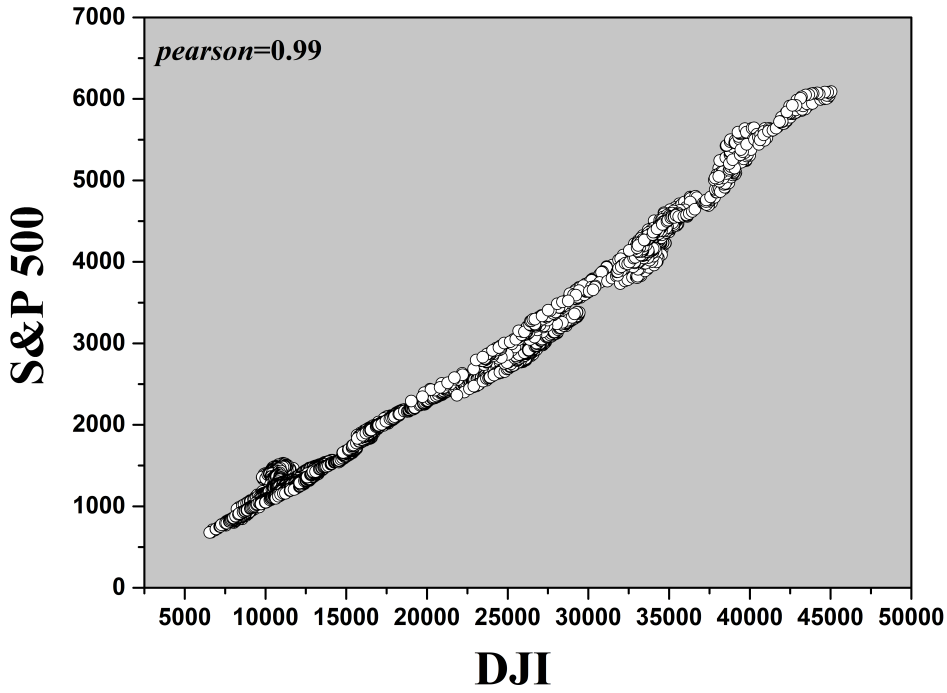
É apresentado na Fig. 2.3 o cruzamento entre os dois índices e é possível identificar uma reta, isso geralmente indica uma correlação linear entre eles. Isso pode ter alguns significados, como a reta é ascendente espera-se que os índices subam ou desçam juntos proporcionadamente. Nela também é calculado o coeficiente de Pearson para indicar a existência dessa correlação, que é o coeficiente mais tradicional, como forma de ilustração.

Para efeitos comparativos e permitir a melhor interpretação da dinâmica de um índice em relação ao outro, é usual em economia utilizar o log-retorno (Eq. 2.1) para calcular a variação percentual de um ativo (como ações, índices, câmbio etc.) ao longo do tempo. Com essa medida é possível padronizar índices permitindo sua comparação.

$$r_t = \ln\left(\frac{I_t}{I_{t-1}}\right) \tag{2.1}$$

A Fig. 2.4 apresenta o retorno dos índices DJI e S&P 500. Nota-se que os retornos estão

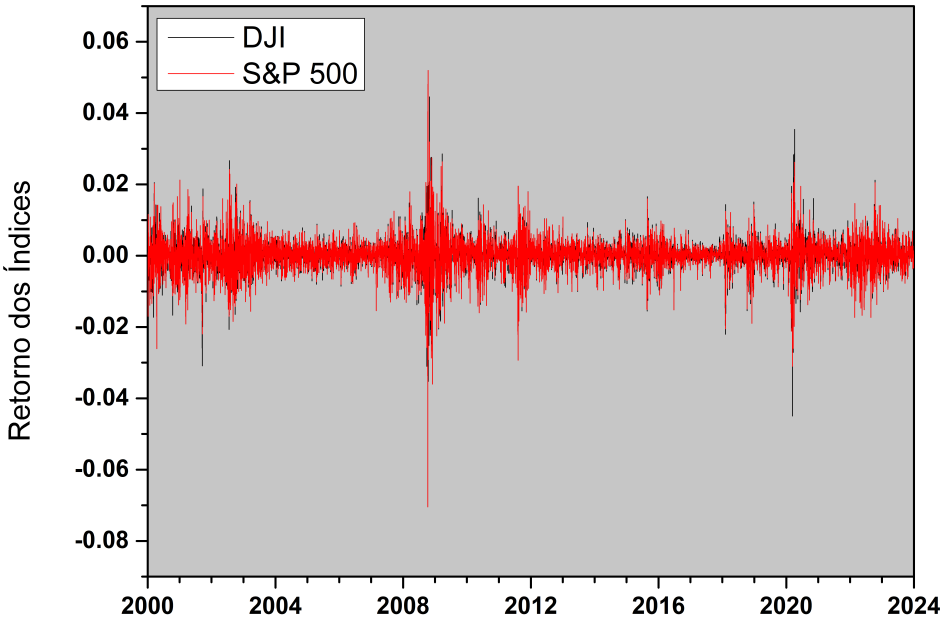
Figura 2.3: Análise de correlação dos índices DJI e S&P 500.




Fonte: Elaboração própria.

sobrepostos, característica que indica o quanto são semelhantes suas volatilidades, além disso é possível notar e ter uma noção de medidas comparativas nas flutuações ocorridas em 2008 e 2020.

Figura 2.4: Retorno dos índices S&P 500 e DJI.

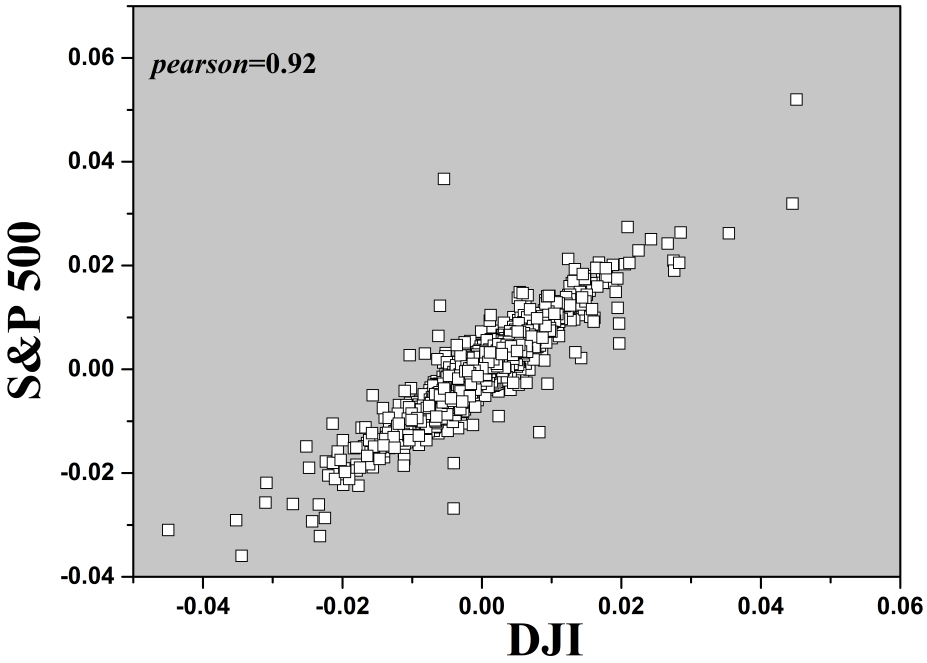



Fonte: Elaboração própria.

Semelhante a Fig. 2.3, tem-se Fig. 2.5 a análise de correlação dos índices DJI e S&P 500,

agora da variável retorno, ambas variando numa mesma escala.

Figura 2.5: Correlação dos retornos dos índices S&P 500 e DJI.




Fonte: Elaboração própria.

Os retornos também estão dispostos de forma linear, indicando uma correlação positiva entre eles. Nela também é calculado o coeficiente de Pearson para medir a qualidade dessa correlação, de maneira a mostra uma interação forte nos retornos, semelhante a apresentada na Fig. 2.3.

A análise de autocorrelação ou correlação cruzada entre entes financeiros caracteriza a dinâmica de volatilidade e descreve o grau de interdependência entre índices de diferentes ativos a partir da análise de séries temporais, onde também é possível investigar memória, persistência, interdependência, conectividade, intensidade e propagação de oscilações (contágio) (QUINTINO; BURNQUIST; FERREIRA, 2021; GUEDES et al., 2019).

O estudo da volatilidade, relação de interdependência e contágio sugere que os preços das ações não se movem de forma isolada, mas em conjunto devido a fatores macroeconômicos, políticos, naturais e psicológicos (ROSARIO; EUGENE, 1999). O conceito de contágio financeiro também é explorado, referindo-se à propagação de volatilidade, que em geral crises financeiras e eventos extremos afetam a dinâmica de propagação dessas flutuações e reestrutura os níveis de correlação entre agentes econômicos (SANTANA et al., 2023a; SANTANA et al., 2023b; SILVA et al., 2016; OKORIE; LIN, 2021).

A dinâmica de correlação é fundamental para entender o comportamento dos mercados

econômicos e financeiros, auxiliando na modelagem de risco e na formulação de estratégias de investimento e mitigação de crises.

## 2.3 Interdependência no setor energético, metais preciosos e agropecuários

A teoria dos Sistemas Complexos tem sido aplicada para entender a dinâmica dos mercados financeiros e suas inter-relações, incluindo criptomoedas, *commodities* energéticas e agrícolas (SANTANA et al., 2023b; REBOREDO, 2012). Estudos recentes indicam que a volatilidade é uma característica inerente a esses mercados e pode ser influenciada por fatores macroeconômicos e políticos (BIELINSKYI et al., 2021b), especialmente no contexto de crises econômicas e eventos externos significativos.

Guedes et al. (2019) analisaram os efeitos do referendo britânico e identificaram uma segmentação do mercado do Reino Unido em relação ao restante da União Europeia. Esse fenômeno demonstra que a interdependência dos mercados pode ser alterada por eventos políticos, afetando a dinâmica de investimentos e estratégias.

A dinâmica econômica inerente ao setor energético, metais e agropecuário possuem estruturas complexas, de modo a que relação de interdependência pode ser analisada para identificar padrões de correlação, volatilidade e transmissão de choques entre ativos (FERREIRA; PEREIRA; PEREIRA, 2020). A análise de redes ponderadas com coeficientes de correlação tem sido utilizada para avaliar interdependência e representar graficamente essa interação (SANTANA et al., 2024). Em períodos de crise, como durante a pandemia da COVID-19 e a invasão Russa à Ucrânia, observou-se um aumento significativo no contágio entre mercados agrícolas, financeiros e energéticos (JUST; ECHAUST, 2022).

Junto a análise de correlação, o estudo das redes complexas tem sido utilizado em várias análises financeiras, demonstrando uma abordagem potencial para estudos econômicos, trazendo resultados inovadores para área (NUNES et al., 2021; SANTANA et al., 2024; HOU; PAN, 2022; SHIN; LIM; MIN, 2020; FERREIRA; PEREIRA; PEREIRA, 2020).

Metais preciosos, como ouro e prata, historicamente funcionam como ativos de reserva de valor e proteção contra a volatilidade do mercado, o chamado "porto seguro". Durante crises financeiras, a demanda por ouro aumenta, refletindo sua função de refúgio em momentos de incertezas, entretanto, a interdependência entre ouro e outros ativos pode variar, tornando sua eficácia como porto seguro relativa a diferentes condições macroeconômicas (GHAZANI; JAFARI, 2021).

A dinâmica nos índices dos metais preciosos evidencia a complexidade no mercado de futuros em especial o do ouro e prata, apresentando características não lineares, o que pode dificultar a previsão de preços e amplificar os efeitos de contágio entre ativos correlacionados (GUO; HUANG; CHENG, 2012).

As energias limpas vêm ganhando relevância no cenário energético global, especialmente devido às mudanças climáticas e à busca por alternativas ao petróleo. A análise da volatilidade dos índices de energia limpa mostra que esse mercado tem dinâmicas próprias, sendo menos exposto a oscilações do petróleo em comparação com outros setores financeiros; no entanto, a interdependência entre energia limpa e *commodities* fósseis ainda persiste (FERREIRA; LOURES, 2020).

O mercado de petróleo é altamente volátil, especialmente diante de eventos geopolíticos. Porém, a análise de suas interações pode prever a dinâmica de outros setores, permitindo a construção de indicadores precoces para choques de preços (BIELINSKYI et al., 2021b). A forte relação entre petróleo, gás natural e biocombustíveis, reforça a necessidade de políticas para mitigar os impactos dessas oscilações (QUINTINO; BURNQUIST; FERREIRA, 2021).

As *commodities* agropecuárias também apresentam forte interdependência de preços em relação aos combustíveis, impactando tanto nos mercados locais quanto internacionais (PAL; MITRA, 2020). Além de serem influenciadas por fatores econômicos e políticos, também estão sujeitas a interferências climáticas e sanitárias e pode implicar em crises alimentares (PAL; MITRA, 2020; FASANYA; ODUDU, 2020). A conectividade desses mercados influenciam a volatilidade dos preços e sua transmissão, impondo desafios para produtores e investidores.

A relação entre biocombustíveis e *commodities* agrícolas, como etanol, açúcar, soja, milho e trigo tem sido estudada na perspectiva da segurança alimentar, entre outros problemas socioeconômicos (PIMENTEL et al., 2009). Ademais, políticas distintas de biocombustíveis impactam a incerteza nos mercados de matéria-prima alimentar, aumentando a volatilidade dos preços dos alimentos (HERWARTZ; SAUCEDO, 2020).

O petróleo, em especial, desempenha um papel preditivo na volatilidade dos preços dos alimentos, sugerindo que choques nos preços do petróleo afetam diretamente o custo dos insumos agrícolas e, consequentemente, os preços dos alimentos (HERWARTZ; SAUCEDO, 2020). Ademais, a integração dos mercados mundiais de exportação e alimentos em países em desenvolvimento é um fator relevante para compreender a transmissão de choques globais sobre os mercados locais, impactando a segurança alimentar e a estabilidade econômica (BAQUEDANO; LIEFERT; SHAPOURI, 2011).

A crescente complexidade dos mercados de energia, agropecuário e metais preciosos exigem abordagens inovadoras e metodologias robustas para análise e previsão de crises, garantindo maior estabilidade e previsibilidade para investidores e formuladores de políticas. Na presente pesquisa serão usadas técnicas como o *Detrended Flutuation Analysis* e *Detrended Cross-Correlation Analysis*, haja vista que, têm se mostrado eficazes para quantificar e qualificar as relações entre ativos e prever riscos sistêmicos (KRISTOUFEK, 2014; SANTANA et al., 2024; GHAZANI; JAFARI, 2021; QUINTINO; BURNQUIST; FERREIRA, 2021; FERREIRA; LOURES, 2020).

## 2.4 Séries temporais

### *Conceitos básicos*

Nesta Seção apresentaremos alguns conceitos sobre séries temporais que auxiliarão a compreensão das produções científicas no Capítulo 3. Além disso, descreveremos os métodos utilizados para análise de séries temporais, DFA e DCCA, como também os coeficientes $\rho_{DCCA}$ e $\Delta\rho_{DCCA}$.

Para Morettin e Toloi (2004), Soares (2020), Hamilton (1994) e Box et al. (2015) séries temporais são conjuntos de elementos arranjados ao longo do tempo e podem ser classificadas como: contínuo (índices diários das bolsas de valores) ou discreto (registro de marés); mas que, em geral, em uma série de tempo contínuo é preciso realizar uma amostra para torna-lá discreta.

A análise de séries temporais, em geral, tem como objetivo descrever o comportamento da série, identificando padrões para previsão e tomada de decisão. A análise de séries temporais é aplicada em diversas áreas (economia, meteorologia, gestão, agronomia e engenharia), como pode ser visto em Fasanya e Odudu (2020), Soares (2020), Kirly e Janosi (2004), Fraedrich e Blender (2003), Zebende, Dias e Aguiar (2022), Filho, Silva e Zebende (2014).

Tradicionalmente uma série temporal é decomposta em quatro partes: Tendência ($T_i$), Sazonalidade ($S_i$), Ciclos ($C_i$) e variações aleatórias ($A_i$) (SOARES, 2020; GUEDES, 2019; FILHO, 2014). Alguns autores como (MORETTIN; TOLOI, 2004) não consideram os ciclos como parte do modelo clássico e nem sempre essa estrutura é adequada para sua análise, portanto, deve-se observar se o modelo consegue descrever com qualidade a série.

- Tendência representa o movimento dos dados a longo prazo em uma determinada direção (crescente ou decrescente), podendo ser caracterizado por uma equação em

função do tempo;

- Sazonalidade são movimentos oscilatórios de curto prazo, menores que um ano. Isso significa que dados registrados anualmente não estão sujeitos a efeitos sazonais;
- Ciclos são movimentos oscilatórios de longo prazo identificados em torno da tendência, em geral para séries maiores que um ano;
- Variações aleatórias representam flutuações irregulares decorrente de fatores inexplicáveis.

Considerando o conjunto $\{Z_i; i = 1, \ldots, N_{max}\}$ uma série temporal de tamanho $N_{max}$, a composição dos seus elementos é feita por adição, multiplicação ou combinação das duas (SOARES, 2020; HAMILTON, 1994; BOX et al., 2015).

Modelo aditivo:

$$Z_i = T_i + S_i + C_i + A_i \tag{2.2}$$

Modelo Multiplicativo:

$$Z_i = T_i \times S_i \times C_i \times A_i \tag{2.3}$$

Modelo Híbrido:

$$Z_i = T_i \times S_i \times C_i + A_i \quad \text{ou} \quad Z_i = T_i \times S_i + C_i \times A_i, \text{ entre outras combinações} \tag{2.4}$$

A escolha entre modelos aditivos e multiplicativos depende da natureza da série e sua relação entre esses componentes, haja vista que o uso correto de cada modelo é importante para a qualidade da análise (MORETTIN; TOLOI, 2004). Em séries econômicas, é comum que a sazonalidade e os ciclos aumentem com o nível da série, o que sugere o uso de modelos multiplicativos (SOARES, 2020; HAMILTON, 1994).

### *Processos Estocásticos*

Processos estocásticos são definidos com uma sequência ordenada no tempo de variáveis aleatórias definidas no mesmo espaço de probabilidade, tal que $Z = \{Z_i, i \in N_{max} \subseteq \mathbb{Z}\}$ e $N_{max}$ é finito e numerável (MORETTIN; TOLOI, 2020; SOARES, 2020). Segundo Soares (2020) em um processo estocástico deseja-se saber se um conjunto de variáveis obedecem a mesma distribuição de probabilidade, onde se obtém características como média, variância, covariância, correlação e autocorrelação, por exemplo.

Além das funções que caracterizam um processo estocástico é possível classificá-lo como estacionário ou não, de maneira que, um processo estocástico estacionário analisá-se a independência da séries em relação as suas condições iniciais (MORETTIN; TOLOI, 2020). Isso significa que em um processo estacionário, características como média, variância, covariância, correlação e autocorrelação, entre outras são preservadas ao longo de todas escala temporal independente das condições iniciais (SOARES, 2020). Ou seja, as características de $Z(i)$ e $Z(i+\tau)$ são as mesmas para toda defasagem $\tau$ (MORETTIN; TOLOI, 2004; HAMILTON, 1994; BOX et al., 2015).

Em contra partida, processo estocástico não estacionário as medidas como: média, variância, covariância, função de autocorrelação e outras, variam de um agrupamento para outro (SOARES, 2020; MORETTIN; TOLOI, 2020).

Em geral, a maioria das séries encontradas na natureza possuem características não estacionárias, porém existem técnicas para transformá-la em estacionária e obter informações adicionais (MORETTIN; TOLOI, 2020; SOARES, 2020). Séries temporais, como índices de preço, admitem características de um processo estocástico não estacionário (SOARES, 2020; MORETTIN; TOLOI, 2020).

## *Principais descritores para análise de processos estocásticos*

### *Média*

Média é a medida de tendência central mais comum. Em uma distribuição de probabilidade simétrica a média, moda e mediana coincidem. Para um processo estocástico $Z = \{Z_i, i \in N_{max}\}$ a média é uma variável aleatória em cada instante definida em função da esperança, isto é $\mu = E(Z_i)$, e sua estimativa é dada pela soma de todas as observações dividida pela sua quantidade.

$$\hat{\mu} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{max}} Z_i}{N_{max}} \tag{2.5}$$

Em um processo estacionário, como $Z_i = Z_{i+\tau}$ para qualquer defasagem $\tau$, tem-se que $E(Z_i) = E(Z_{i+\tau})$. Isto é, a média para qualquer subconjunto da série possui a mesma estimativa $\hat{\mu}(Z_i) = \hat{\mu}(Z_{i+\tau})$.

### *Variância*

A variância é uma medida de dispersão que quantifica o quanto os valores de um conjunto de dados se desviam da média. Podemos obter a variância em termos da esperança $Var(Z_i) = E[(Z_i - \mu)^2]$ e desvio padrão.

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N_{max}} (Z_i - \hat{\mu})^2}{N_{max}} \tag{2.6}$$

A Eq. 2.6 mostra que a variância tem unidade igual ao quadrado da unidade dos dados originais.

### *Covariância*

A covariância é uma medida estatística que avalia a direção da relação linear entre duas variáveis aleatórias. Ela indica se um aumento em uma variável está associado a uma diminuição (ou aumento) na outra.

- Covariância positiva: As variáveis tendem a variar na mesma direção;
- Covariância negativa: As variáveis variam em direções opostas;
- Covariância zero: Não há relação linear direta entre as variáveis.

Considere duas observações $Z_i$ e $Z_{i+\tau}$ com defasagem $\tau$ a covariância entre elas é dada por: $C\hat{o}v(Z_i, Z_{i+\tau}) = E[(Z_i - \mu)(Z_{i+\tau} - \mu)]$ e sua estimativa é dada por:

$$C\hat{o}v = \frac{\sum_{i=1}^{N_{max}} [(Z_i - \hat{\mu})(Z_{i+\tau} - \hat{\mu})]}{N_{max} - \tau} \tag{2.7}$$

A magnitude da covariância não é padronizada, dificultando comparações e força entre sua interação. A covariância é útil para entender a direção da relação entre variáveis, mas deve ser complementada com outras métricas (como correlação) para uma análise mais robusta.

### *Correlação*

A correlação de Pearson é uma medida que quantifica o grau e a direção da relação linear entre duas variáveis. Diferentemente da covariância, a correlação é padronizada, variando sempre entre -1 e 1, o que facilita a comparação entre diferentes conjuntos de dados.

- Correlação positiva (+1 a 0): Indica que as variáveis tendem a variar na mesma direção;
- Correlação negativa (-1 a 0): Indica que as variáveis variam em direções opostas;
- Correlação próxima de 0: Sugere ausência de relação linear.

A Eq. 2.8 apresenta a correlação em função da covariância e desvio padrão.

$$Corr(Z_i, Z_{i+\tau}) = \frac{Cov(Z_i, Z_{i+\tau})}{\sigma_{Z_i}\sigma_{Z_{N_{max}-\tau}}} \tag{2.8}$$

A correlação é uma ferramenta essencial para entender relações lineares em dados, mas deve ser usada com cautela para evitar inferências incorretas.

Já a função de autocorrelação é uma ferramenta usada para medir a semelhança de uma série e sua versão defasada ao longo do tempo. Ou seja, é a correlação entre a série original e diferentes intervalos de tempo $\tau$.

A Eq. abaixo 2.9 apresenta a autocorrelação em função da defasagem $\tau$.

$$\rho(\tau) = \frac{Cov(Z_t, Z_{t+\tau})}{\sigma^2_{Z_t}} \tag{2.9}$$

Em geral, a função de autocorrelação é uma representação gráfica que indica o valor de $\hat{\rho}(\tau)$ para várias defasagens. Semelhante aos possíveis resultados na análise de correlação, a autocorrelação é uma medida adimensional variando na escala de -1 a 1, de modo que:

- Valores entre +1 e 0: Indica autocorrelação positiva;
- Valores entre -1 e 0: Indica autocorrelação negativa;
- Valores próximos de 0: Sugere ausência de autocorrelação.

A análise do comportamento da autocorrelação para várias defasagens pode ser utilizado para caracterizar uma série quanto a existência de estacionaridade, periodicidade e memória. No caso em que há não estacionaridade entre as séries, um nova metodologia deve ser apresentada, como veremos logo abaixo.

### *Método DFA - Detrended Fluctuation Analysis*

O método DFA foi desenvolvido por Peng et al. (1994) que analisou as autocorrelações de longo alcance em sequências de DNA. Este método permite avaliar a existência de memória (autoafinidade) numa série e evita a identificação de dados espúrios (PENG et al., 1994; SANTANA et al., 2023a). Este método é recomendado para análise de autocorrelação em séries não estacionárias (PENG et al., 1994; PODOBNIK; STANLEY, 2008; FILHO, 2014; ZEBENDE; DIAS; AGUIAR, 2022).

O DFA tem sido aplicado em inúmeras áreas de estudo. Por exemplo nas ciências Econômicas (SANTANA et al., 2023a; KRISTOUFEK; VOSVRDA, 2013; KRISTOUFEK; FERREIRA, 2018; DIAS et al., 2021; GUEDES, 2019; FENG; LIU; YANG, 2021), nas ciências Biológicas (WALLECZEK, 2000; SCHAFFARCZYK et al., 2022; PENG et al., 1994; PENG et al., 1995; GRONWALD; HOOS, 2019) e nas ciências Ambientais (BRITO, 2021; BRITO et al., 2018; FRAEDRICH; BLENDER, 2003; KIRLY; JANOSI, 2004; KOSCIELNY-BUNDE et al., 1998).

A função de Flutuação $F_{DFA}$ é calculado segundo os seguintes passos:

Considere inicialmente a série temporal $\{x_i\}$ (por exemplo preço), em que $i = 1, \cdots, N_{max}$ (tamanho da série). A partir delas segue os passos:

1. Integra-se a série temporal: $X_k = \sum_{i=1}^{k}[x_i - \langle x \rangle]$, com $k = 1, \cdots, N_{max}$. Aqui, $\langle x \rangle$ é a média aritmética de $x_i$.
2. Divide-se toda a série em $(N_{max} - n)$ caixas sobrepostas de tamanho $n$ contendo $(n + 1)$ valores cada uma;
3. Em cada caixa que inicia em $i$ e termina em $i + n$ calcula-se pelo método dos mínimos quadrados a tendência linear $\widetilde{X}_{k,i}$ para cada elemento $\{x_i\}$ da caixa, com

$(i \leq k \leq i+n)$;

4. Em cada caixa é calculado a função

$$f^2_{DFAx}(n,i) = (n+1)^{-1} \sum_{k=i}^{i+n} (X_k - \widetilde{X}_{k,i})^2; \tag{2.10}$$

5. Agora é calculado para cada escala temporal $n$ a função de flutuação sem tendência a partir da equação

$$F^2_{DFAx}(n,i) = (N_{max} - n)^{-1} \sum_{i=1}^{N_{max}-n} f^2_{DFAx}(n,i); \tag{2.11}$$

em que os passos **2**, **3**, **4** e **5** são repetidos para $4 \leq n \leq N_{max}/4$.

Ajustando a função $F_{DFAx}$ a lei de potência, verifica-se Eq. 2.12

$$F_{DFAx}(n) \sim n^{\alpha_{DFA}} \tag{2.12}$$

na escala temporal $n$, logo o expoente de autocorrelação $\alpha_{DFA}$ é o coeficiente angular da reta $\log F_{DFAx}(n) = \alpha_{DFA} \times \log n$.

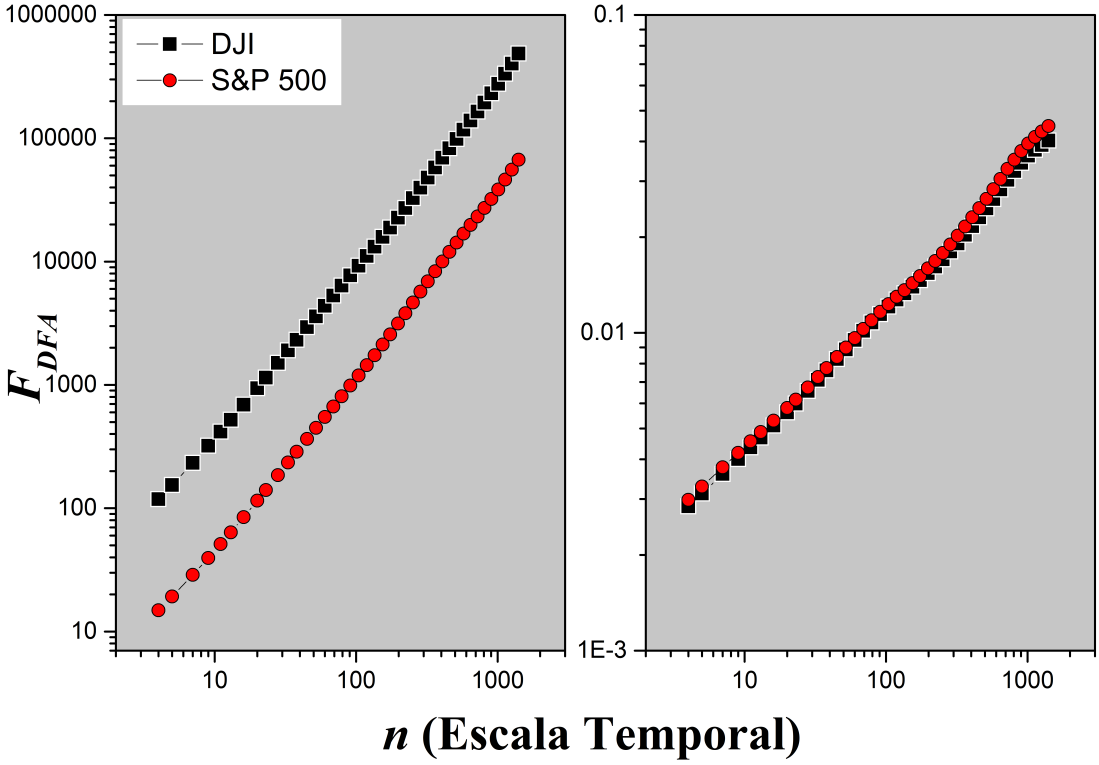
A Fig. 2.6 apresenta a função de flutuação $F_{DFA}$ na escala logarítmica, na qual é possível determinar o expoente de autocorrelação $\alpha_{DFA}$. Comparando as duas figuras, nota-se que é possível fazer a comparação da autocorrelação entre os índices a partir da análise dos retornos, haja vista que as séries estão padronizadas.

Temos que, com o expoente $\alpha_{DFA}$ é possível medir o nível de autocorrelação de longo alcance da série $\{x_i\}$ ajudando-nos a analisar as propriedades de memória e persistência.

Segundo Santana et al. (2023a), Brito (2021), Zebende, Fernandez e Pereira (2016), Walleczek (2000) podemos qualificar a autocorrelação de longo alcance da série a partir do expoente $\alpha_{DFA}$ conforme tabela 2.1.

Autocorrelação antipersistente significa que valores grandes têm maior probabilidade de serem seguidos por valores pequenos e vice-versa. Autocorrelação persistente indica que valores grandes (pequenos) têm maior probabilidade de serem seguidos por grandes valores (pequenos). Ruído $1/f$ a série é pouco difusa (a frequência do sinal tem pequenas amplitudes). Não estacionaridade mostra que as medidas descritivas variam ao longo da série. Por fim, ruído Browniano a frequência do sinal tem amplitudes de várias tamanhos

Figura 2.6: Função de flutuação $F_{DFA}$ em função da escala temporal $n$ ajustada a lei de potência na escala logarítmica. A esquerda temos a função de flutuação dos índices DJI e S&P 500 e a direita a função de flutuação e seus respectivos retornos.




Fonte: Elaboração própria.

(LØVSLETTEN, 2017; PESSOA et al., 2021; BRITO, 2021; FILHO, 2014; GALHARDO et al., 2009).

## *Método DCCA - Detrended Cross-Correlation Analysis*

O método DCCA formulado por Podobnik e Stanley (2008) para análise da correlação cruzada entre duas séries não estacionárias de mesmo tamanho. Este método é considerado

Tabela 2.1: Caracterização da autocorrelação na série.

| **Expoente $\alpha_{DFA}$** | **Tipo do sinal** |
|---|---|
| $\alpha_{DFA} < 0.5$ | Autocorrelacão antipersistente |
| $\alpha_{DFA} \simeq 0.5$ | Descorrelacionada |
| $\alpha_{DFA} > 0.5$ | Autocorrelacão persistente |
| $\alpha_{DFA} \simeq 1$ | Ruído $1/f$ |
| $\alpha_{DFA} > 1$ | Não estacionária |
| $\alpha_{DFA} \simeq 3/2$ | Ruído browniano |

Fonte: Adaptado de Peng et al. (1994)

um generalização do DFA. Igualmente ao DFA, podemos identificar a aplicação do DCCA em várias áreas científicas (PODOBNIK et al., 2009; KRISTOUFEK, 2014; GUEDES et al., 2017; FENG; LIU; YANG, 2021).

Para identificarmos a existência, ou não, de correlação cruzada pela método DCCA devemos considerar duas séries temporais $\{x_i\}$ e $\{y_i\}$ de tamanho $N$. Semelhante ao DFA, integramos $\{x_i\}$ e $\{y_i\}$ para obter as séries integradas $X_k = \sum_{i=1}^{k}[x_i - \langle x \rangle]$ e $Y_k = \sum_{i=1}^{k}[y_i - \langle y \rangle]$, com $k = 1, \cdots, N_{max}$.

Também dividimos as séries $\{X_i\}$ e $\{Y_i\}$ em $(N_{max} - n)$ caixas sobrepostas de tamanho $n$ contendo $(n + 1)$ pontos. Daí seguimos os passos:

1. Em ambas séries, calcula-se a tendência linear $\widetilde{X}_{k,i}$ e $\widetilde{Y}_{k,i}$ para cada elemento $\{x_i\}$ e $\{y_i\}$ da caixa que inicia em $i$ e termina em $i + n$, com $(i \leq k \leq i + n)$;
2. Em cada caixa é calculado a função de covariância

$$f^2_{DCCAx;y}(n, i) = 1/(n + 1) \sum_{k=i}^{i+n} (X_k - \widetilde{X}_{k,i})(Y_k - \widetilde{Y}_{k,i}); \tag{2.13}$$

3. Seguidamente calcula-se a função de covariância sem tendência a partir da expressão

$$F^2_{DCCAx;y}(n, i) = (N_{max} - n)^{-1} \sum_{i=1}^{N_{max}-n} f^2_{DCCAx;y}(n, i). \tag{2.14}$$

Sendo os passos anteriores repetidos para escala temporal $4 \leq n \leq N_{max}/4$ podemos identificar a lei de potência $F^2_{DCCAx;y}(n) \sim n^{2\lambda_{DCCA}}$ de modo que sua linearização nos dá o expoente de correlação $\lambda_{DCCA}$. Logo, para $\lambda_{DCCA} \approx 0$ não há correlação cruzada e para $\lambda_{DCCA} \geq 0.5$ existe correlação cruzada persistente.

Segundo Podobnik e Stanley (2008), Filho (2014), Zebende, Silva e Filho (2013) $\lambda$ pode ser estimado a partir do expoente de autocorrelação. Tomando os expoentes de autocorrelação $\alpha_{DFA_x}$ e $\alpha_{DFA_y}$, em geral, pode-se obter a equação (FILHO, 2014; ZEBENDE; SILVA; FILHO, 2013; PODOBNIK; STANLEY, 2008).

$$\lambda_{DCCA} \approx \frac{\alpha_{DFA_x} + \alpha_{DFA_y}}{2} \tag{2.15}$$

O expoente $\lambda_{DCCA}$ identifica a existência de correlação entre as leis de potências, mas não quantifica o nível de correlação cruzada (ZEBENDE, 2011; ZEBENDE; SILVA; FILHO,

2013). Para melhor avaliação utilizaremos coeficiente de correlação cruzada $\rho_{DCCA}$, haja vista que ele é capaz de quantificar e qualificar o nível de correlação (ZEBENDE, 2011).

### *Coeficiente* $\rho_{DCCA}$

Criado por Zebende (2011) o coeficiente $\rho_{DCCA}$ foi desenvolvido com objetivo de quantificar a correlação cruzada em séries, $\{x_i\}$ e $\{y_i\}$, em diferentes escala temporais $n$. Ele é desenvolvido a partir dos métodos DFA e DCCA, apresentados anteriormente, e definido como a razão entre a função $F^2_{DCCAx;y}(n)$ pelas funções $F_{DFAx}(n)$ e $F_{DFAy}(n)$

$$\rho_{DCCA}(n) \equiv \frac{F^2_{DCCAx;y}(n)}{F_{DFAx}(n)\, F_{DFAy}(n)}. \tag{2.16}$$

O coeficiente, $\rho_{DCCA}(n)$, é uma variável adimensional definida no intervalo real de $[-1, 1]$, i.e. $-1 \leq \rho_{DCCA}(n) \leq 1$, em que $\rho_{DCCA} = -1$ indica anticorrelação cruzada perfeita, $\rho_{DCCA} = 0$ não há correlação cruzada e $\rho_{DCCA} = 1$ indica correlação cruzada perfeita (ZEBENDE, 2011). Em Silva et al. (2016) é identificado uma escala para o nível de correlação cruzada 2.2.

Tabela 2.2: Qualificação do nível de correlação cruzada.

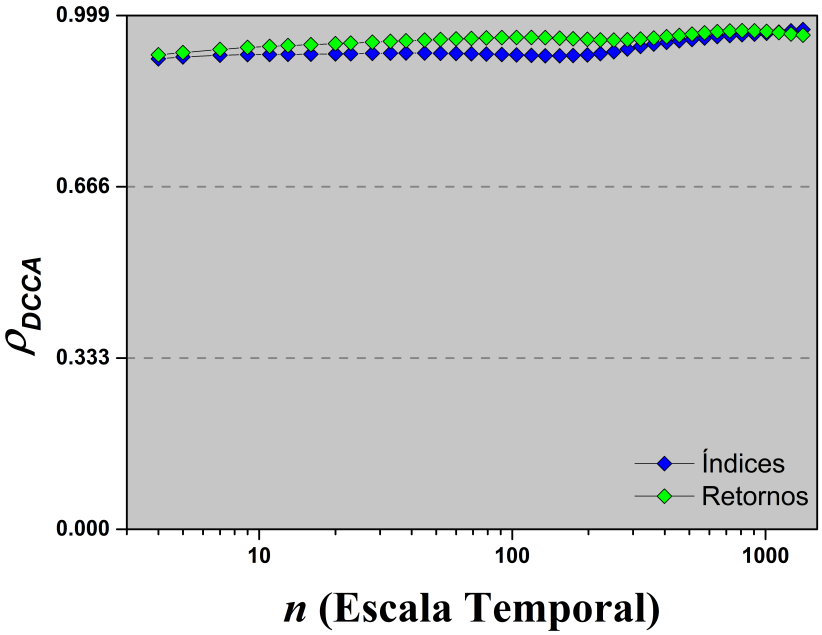
| **Condição** | $\rho_{DCCA}$ |
|---|---|
| Anticorrelação Forte | $-0,999 \mapsto -0,666$ |
| Anticorrelação Média | $-0,666 \mapsto -0,333$ |
| Anticorrelação Fraca | $-0,333 \mapsto 0,000$ |
| Correlação Fraca | $0,000 \mapsto 0,333$ |
| Correlação Média | $0,333 \mapsto 0,666$ |
| Correlação Forte | $0,666 \mapsto 0,999$ |

Fonte: Adaptado de Silva et al. (2016).

Na Fig. 2.7 temos a correlação entre os índices e os retornos DJI e S&P 500 e nela pode ser identificada e qualificada o nível de correlação entre as variáveis para várias escalas temporais. Ela nos mostra a existência de correlação forte para os dois cruzamentos.

Em Podobnik et al. (2009) podemos identificar a robustez do coeficiente $\rho_{DCCA}$ para análise de correlação cruzada para séries com $N$ de 250 a 8000 pontos. Já em Zebende, Brito e Castro (2019) temos que o expoente $\alpha_{DFA}$ e o coeficiente $\rho_{DCCA}$ permanecem robustos até com remoção aleatória de 50% da série. A implementação do algoritmo do $\rho_{DCCA}$ é apresentado pelo professor Doutor Gilney Figueira Zebende no link ⟨https://www.youtube.com/live/RQL7Db74yG0?si=dGCHbxVCKapZX5oy⟩.

Figura 2.7: Coeficiente de correlação cruzada $\rho_{DCCA}$ entre as séries dos índices DJI e S&P 500 apresentados na Fig. 2.2 e 2.4.




Fonte: Elaboração própria.

### *Coeficiente* $\Delta\rho_{DCCA}$

Com o coeficiente $\rho_{DCCA}$ podemos medir o nível de interdependência entre duas séries, porém, para medir o efeito de um evento ou pertubação nesta relação (por exemplo: crise política, financeira, econômica, interferência governamental, etc em séries econômicas), ou seja, efeito de contágio deve-se usar o coeficiente $\Delta\rho_{DCCA}$ (SANTANA et al., 2023a; OKORIE; LIN, 2021; FERREIRA et al., 2019; GUEDES et al., 2017; SILVA et al., 2016). Ele consiste na variação do nível de correlação antes e depois de um evento, sendo definida segundo a Eq. 2.17.

$$\Delta\rho_{DCCA}(n) \equiv \rho_{DCCA}^{\text{pós crise}}(n) - \rho_{DCCA}^{\text{pré crise}}(n) \tag{2.17}$$

A tabela 2.3 mostra os parâmetros para avaliação do efeito de contágio entre duas séries.

Tabela 2.3: Caracterização do efeito de contágio.

| $\Delta\rho_{DCCA}$ | **Caracterização do tipo de contágio** |
|---|---|
| $\Delta\rho_{DCCA} > 0$ | Contágio positivo |
| $\Delta\rho_{DCCA} = \mathbf{0}$ | Não há contágio |
| $\Delta\rho_{DCCA} < 0$ | Contágio negativo |

Fonte: Adaptado de Silva et al. (2016).

Guedes et al. (2018b) mostrou que a acurária deste coeficiente depende do tamanho da série $N$ e de sua escala temporal $n$, podendo definir um valor crítico para esta dependência em 90%, 95% e 99% de nível de confiança.

Capítulo Três

# Produções Científicas

É apresentado neste Capítulo as produções científicas desenvolvidas durante o projeto de pesquisa a partir dos objetivos específicos traçados na investigação. As produções estão organizadas segundo a data de publicação e submissão.

Na Seção 3.1, 3.2, 3.4 e 3.5 temos os artigos publicados em revistas, na seção 3.3 trabalho publicado em evento e na 3.6 o artigo submetido.

No artigo 3.1 estudou-se a relação de interdependência e efeito de contágio entre metais preciosos e petróleo, publicado na revista *Sustainability*. No artigo 3.2 desenvolvemos uma análise bibliométrica sobre interdependência e contágio em *commodities* agropecuárias, revista *Equilibrium*. No artigo 3.4 estudamos a interdependência em *commodities* agropecuárias no estado da Bahia. Desenvolvemos também um estudo bibliométrico sobre a Econofísica como campo científico, artigo 3.5, durante o período de visitação ao Instituto Politécnico de Setúbal. O artigo publicado no Encontro Nacional de Modelagem Computacional (2023), 3.3, analisamos as autocorrelações em índices de preço do boi gordo, milho e soja. O manuscrito 3.6 está submetido a revista Estudos econômicos da USP e está em processo de avaliação, nele estudamos a relação de interdependência em índices de empresas do segmento de energias limpas, através da análise de redes complexas.

Outros artigos foram produzidos durante o processo de doutoramento, de modo que estes se relacionam indiretamente com este trabalho de Tese e estão dispostos nos anexos A.

sustainability

MDPI

Article

# Effects of Interdependence and Contagion on Crude Oil and Precious Metals According to $\rho_{DCCA}$: A COVID-19 Case Study

**Thiago Pires Santana [1,2], Nicole Horta [3], Catarina Revez [3], Rui Manuel Teixeira Santos Dias [1,3,4] and Gilney Figueira Zebende [2,*]**

[1] Earth Sciences and Environment Modeling Program, State University of Feira de Santana, Feira de Santana 44036-900, BA, Brazil
[2] Physics Department and in the Earth Sciences and Environment Modeling Program, State University of Feira de Santana, Feira de Santana 44036-900, BA, Brazil
[3] School of Business and Administration, Polytechnic Institute of Setúbal, 2910-761 Setúbal, Portugal
[4] Center for Advanced Studies in Management and Economics, University of Évora, 7004-516 Évora, Portugal
* Correspondence: gfzebende@uefs.br

**Abstract:** The energy sector has been the main economic hub in everyone's lives and in world geopolitics. Consequently, oil, gas, electricity and energy from renewable sources (wind and solar) are traded on the stock market, and all interconnected around the world. On the other hand, a global health crisis, such as COVID-19, can produce a great economic catastrophe. In this scenario, a robust statistical analysis will be performed here with respect to the concept of interdependence and contagion effect. For this project, we chose to study the relationship between the main source of energy (crude oil, **WTI** and **Brent**) and two (**Gold** and **Silver**) precious metals (which are a safe haven for investment). Therefore, with the novelty of the application of $\rho_{DCCA}$ and $\Delta\rho_{DCCA}$ coefficients before and during the COVID-19 crisis (announced by the World Health Organization), the interdependence and the contagion effect were calculated. We verified that COVID-19 had no influence on contagion effect between crude oil in its indexes, **WTI** and **Brent**, since they have already shown to be highly interdependent, both before and after the World Health Organization COVID-19 decree. Likewise, COVID-19 had a significant influence on the crude oil and precious metal sectors, which was evident as we identified an increase in its interdependence, with a clearly positive contagion. These results show that COVID-19 imposed a restructuring in the relationship between energy (crude oil) and precious metals. More details will be presented throughout this article.

**Keywords:** DCCA cross-correlation; interdependence; contagion; energy; precious metals; COVID-19

check for updates

**Citation:** Santana, T.P.; Horta, N.; Revez, C.; Dias, R.M.T.S.; Zebende, G.F. Effects of Interdependence and Contagion on Crude Oil and Precious Metals According to $\rho_{DCCA}$: A COVID-19 Case Study. *Sustainability* **2023**, *15*, 3945. https://doi.org/10.3390/su15053945

Academic Editors: Syed Ahsan Ali Shah, Sharafat Ali and Gordhan Das Valasai

Received: 13 December 2022
Revised: 13 February 2023
Accepted: 16 February 2023
Published: 21 February 2023



## 1. Introduction

Globalization has led to the destruction of barriers to international investment in many countries in recent decades, this has caused greater integration, which led to a greater correlation (interdependence) between the stock markets of different countries. This interdependence is often useful during periods of calm, but in periods of crisis, it can make it difficult to diversify portfolios efficiently [1,2]. Economic crises generate difficulties in the maintenance and sustainability of social structures, leading in the majority of cases to unemployment, shortages, inflation and hunger, among other things [3]. Therefore, the benefits of diversifying international financial portfolios have been put to the test, mainly due to various crises in the financial markets [2,4–6]. The correlation and transmission of crises has been discussed frequently in recent decades, especially after the 2008 financial crisis [7–9]. In this sense, knowledge concerning the form and the intensity of the interdependence between different financial markets is vital for efficient decision making, the assessment of the financial health of a market and the identification of diversification opportunities to minimize the adverse effect of uncertainty on the expected return on investments. The relationship between interdependence and the contagion effect (caused

by crises) is determined in this paper through an auto-correlation and cross-correlation analysis [9–11], which can also be measured.

We all know that oil, gas, electricity and energy from renewable sources (wind and solar) are traded on the stock market and are interconnected around the world. A global health crisis, such as COVID-19, can have drastic effects on the economy. Recent studies have analyzed the contagion effect caused by the COVID-19 pandemic, as can be seen in [12–16]. Therefore, a statistical analysis will be performed below with respect to the concept of interdependence and contagion effect. We chose to study the relationship between the main sources of energy (crude oil, **WTI** and **Brent**) and two (**Gold** and **Silver**) precious metals, because these are good economic indicators of a country's well-being. With these indexes, we applied $\rho_{DCCA}$ and $\Delta\rho_{DCCA}$ coefficients, and thus measure the interdependence and the contagion effect caused by COVID-19.

In order to present this novelty, we structured this paper as follows: Section 2 reviews state-of-the-art articles on financial contagion, Section 3 describes the methodology, Section 4 contains the data, results and discussions, and finally, Section 5 presents the conclusions.

## 2. Literature Review

Since the mid-2000s, international financial markets have been subject to a series of significant financial crises, including the subprime crisis (USA in 2008) and the sovereign debt crisis (Europe in 2010) [7]. Assessing the current state of financial integration and shocks between markets is also relevant from a point of view of cost versus benefit. The literature agrees that financial integration is beneficial in good times. However, in times of crisis, high financial integration increases the likelihood of contagion, due to the close interrelationships between financial markets caused by their proximity. In general, the benefits of financial integration are expected to outweigh the long-term costs [17].

Andriosopoulos et al. [18] investigated whether or not events during the European financial crisis affected energy prices. The authors studied contagion effects for energy/commodity prices, examined the nature of energy price volatility and investigated whether or not the volatility of European Union stock markets spilled over, subsequently affecting the volatility of other energy/commodity markets. The authors show the existence of significant contagion effects in these stock markets, as well as significant changes in the nature of energy/commodity volatility during the 2010 financial crisis. Gunay [19] studied the influence of the 2020 global pandemic on six stock markets, noting the existence of contagion and structure breaks in most markets between the 19th and 21st of February 2020, while in the Chinese stock market, the break occurred on the 30th of January. Fang et al. [20] analyzed the contagion in emerging stock markets, during the period 2000–2016, using the impulse response method and dynamic conditional correlation (MGARCH) model. The authors show that the level of volatility in emerging stock markets was higher than in developed stock markets. Complementary, they suggest that emerging stock markets are significantly subjected to residual contagion during the US subprime mortgage crisis and Europe's protracted debt crisis. Moreover, the residual contagion effects of these two crises are noticeably heterogeneous in emerging markets. Ghorbel and Jeribi [21] analyzed the contagion among the energy index, crude oil, gas prices and financial assets during the 2020 global pandemic crisis. Using the model ARMA-EGARCH, Ozturk and Cavdar [12] analyzed the contagion effect between Bitcoin, Gold and oil prices and exchange rates, as well as the connections between the volatilities of these variables during the COVID-19 pandemic. In a complementary way, Ghorbel and Jeribi [22] investigated the relationship between the volatilities of cryptocurrencies and other financial assets. In this case, the results of the BEKK-GARCH model show evidence of a higher volatility spillover between cryptocurrencies and lower volatility spillover between cryptocurrencies and financial assets. The results of the DCC-GARCH model identify an important effect of writing Bitcoin futures. During the period of stability, the overarching implications of the results are that there is a persistent high positive value of correlation between cryptocurrencies and low dynamic conditional correlations between cryptocurrencies and financial assets.

For these authors, Bitcoin and Gold were considered hedges for US investors before the COVID-19 crisis. Furthermore, the authors show that cryptocurrencies can offer diversification benefits for investors and are diversified during the stability period. Malik et al. [23] measured the contagion effect during COVID-19 by considering the volatility spillovers of BRIC countries and using a diagonal BEKK approach.

More recently, Rastogi et al. [13] studied the contagion effect among Gold, crude oil and interest rates to investigate the volatility integration of Gold and crude oil prices with the interest rates in India, in the period from 30 November 2015 to 16 November 2020. The authors show the existence of long-term conditional correlations between Gold and interest rates, but there is no evidence of the spillover volatility of Gold and crude oil on interest rates. Marwanti and Robiyanto [14] analyzed the oil and Gold price volatility on the Indonesian stock market during the COVID-19 pandemic using the GARCH (1,1) model. The results showed that Gold was a safe haven during the 2020 pandemic. Mishra et al. [15] analyzed the causal relationships between spot and future prices of crude oil and Gold by applying tests of rolling, recursive evolving and asymmetric causality. The authors show that there are causal relationships for both crude oil and Gold prices. Saijai et al. [16] examined the contagion effects among stock markets, treasury bills, oil, Gold, and Cryptocurrency during the COVID-19 crisis. The authors used multivariate models based on dynamic conditional correlations. Many other recent studies of financial contagion have been carried out.

## 3. Methods

The calculations in this paper are based on Detrended Fluctuation Analysis (DFA) [24] and Detrended Cross-Correlation Analysis (DCCA) [25]. These applications are justified by the fact that they can quantify the level of cross-correlation between two non-stationary time series (as in our case). The algorithm for implementing the DFA and DCCA methods is described below. Initially, for two non-stationary time series, $\{x_i\}$ and $\{y_i\}$ (price of the commodity), where $i = 1, \cdots, N_{max}$ (time series length), we perform the following computational steps.

**Algorithm for DCCA computation:**

a Compute the integrated time series: $X_k \equiv \sum_{i=1}^{k}[x_i - \langle x \rangle]$ and $Y_k \equiv \sum_{i=1}^{k}[y_i - \langle y \rangle]$, with $k = 1, \cdots, N_{max}$. Here, $\langle x \rangle$ and $\langle y \rangle$ are the means of $x$ and $y$, respectively.

b Divide the entire time series into $(N_{max} - n)$ *overlapping* boxes that each contain $(n + 1)$ values.

c For both time series, in each box that starts at $i$ and ends at $(i + n)$, compute the local trend, $\widetilde{X}_{k,i}$ and $\widetilde{Y}_{k,i}$, with $(i \leq k \leq i + n)$, as the ordinate of a linear least-squares fit.

d The covariance function in each box is calculated as follows:

$$f^2_{DCCA\,,\,x;y}(n, i) \equiv 1/(n + 1) \sum_{k=i}^{i+n} (X_k - \widetilde{X}_{k,i})(Y_k - \widetilde{Y}_{k,i});$$

e The detrended covariance function is computed as follows:

$$F^2_{DCCA\,,\,x;y}(n, i) \equiv (N_{max} - n)^{-1} \sum_{i=1}^{N_{max}-n} f^2_{DCCA\,,\,x;y}(n, i);$$

f Finally, steps **b**, **c**, **d** and **e** are repeated for the following time scales, $4 \leq n \leq N_{max}/4$.

As $F_{DCCA}$ is the generalization of $F_{DFA}$ for two distinct time series ([25]), we can write:

$$F_{DFA-x}(n) = \sqrt{F^2_{DCCA\,,\,x;x}(n)} \text{ and } F_{DFA-y}(n) = \sqrt{F^2_{DCCA\,,\,y;y}(n)}$$

Therefore, with the fluctuation function $F_{DFA}$, it is possible to determine whether or not auto-correlation exists in time series with power-law between $F_{DFA}$ and the time scale $n$; in other words:

$$F_{DFA}(n) \sim n^{\alpha_{DFA}}, \tag{1}$$

In this case, $\alpha_{DFA}$ is defined as a self-affinity parameter that represents the long-range auto-correlation (see Table 1 below and [26]):

**Table 1.** $\alpha_{DFA}$ exponent and types of signals.

| Exponent | Type of Signal |
|---|---|
| $\alpha_{DFA} < 0.5$ | anti-persistent |
| $\alpha_{DFA} \simeq 0.5$ | uncorrelated, white noise |
| $\alpha_{DFA} > 0.5$ | long-range correlated persistent |
| $\alpha_{DFA} \simeq 1$ | $1/f$ noise |
| $\alpha_{DFA} > 1$ | non-stationary |
| $\alpha_{DFA} \simeq 3/2$ | Brownian noise |

The DFA method is also able to identify seasonal components [27–29], and the amplitude of $F_{DFA}(n)$ can be applied to classify or distinguish different types of signals [30].

To quantify the level of cross-correlation, the DCCA cross-correlation coefficient can be defined as the ratio between the detrended covariance function, $F^2_{DCCA}$, and the detrended variance function, $F_{DFA}$ [31]:

$$\rho_{DCCA}(n) \equiv \frac{F^2_{DCCA\,,\,x;y}(n)}{F_{DFA-x}(n)\,F_{DFA-y}(n)}. \tag{2}$$

The value of $\rho_{DCCA}$ has the following range:

$$-1.0 \leq \rho_{DCCA} \leq 1.0$$

In this case, $\rho_{DCCA} = 0.0$ means there is no cross-correlation, and it splits the level of cross-correlation between the positive case and the negative case. This coefficient has been tested on selected time series [32,33] and proved to be quite robust, mainly for the statistical analysis of non-stationary time series [34–37] and specifically for climatology [38,39], turbulent fluids [40,41] and geology [42], among other fields. For more information about the algorithm for DCCA computation, see the following YouTube video (in Portuguese): https://www.youtube.com/watch?v=RQL7Db74yG0&t=394s, accessed on 10 January 2023. With $\rho_{DCCA}$, it is possible to define the interdependence between two financial indexes (see [8]). However, if we want to measure the effect that a crisis has had on a financial market (and therefore on its index), the difference between the values of $\rho_{DCCA}$, separated by an amount of time (for example, the duration of crisis), is an excellent candidate. This difference will be defined here as follows:

$$\Delta\rho_{DCCA}(n) \equiv \rho^{after}_{DCCA}(n) - \rho^{before}_{DCCA}(n) \tag{3}$$

where the values are separated by a given moment (e.g., crisis) denoted by $M_{crisis}$:

✓ $\rho^{after}_{DCCA}$ is the value of the DCCA cross-correlation coefficient **after** $M_{crisis}$;
✓ $\rho^{before}_{DCCA}$ is the value of the DCCA cross-correlation coefficient **before** $M_{crisis}$.

With $\Delta\rho_{DCCA}$, it is possible to evaluate the transmission of contagion effects, both locally and globally, based on the assessment of $\rho_{DCCA}$ values before and after a critical event ($M_{crisis}$) [9]. Therefore, by definition, $\Delta\rho_{DCCA}$ can be positive or negative:

$$\Delta\rho_{DCCA} \begin{cases} > 0 & \text{if the contagion effect was positive;} \\ = 0 & \text{if the contagion effect was not observed;} \\ < 0 & \text{if the contagion effect was negative.} \end{cases} \tag{4}$$

For more details, see [9,33,43].

Now, in order to measure the interdependence and the contagion effect (due to COVID-19) between crude oil (**WTI** and **Brent**) and precious metals (**Gold** and **Silver**), we present the data, results and discussion below.

## 4. Data, Results and Discussion

Here, we present the data used and the results obtained to discuss the interdependence between crude oil and precious metal indexes, as well as the contagion effect generated by COVID-19.

### *4.1. Data*

We used the opening daily price indexes (in USD) for a barrel of West Texas Intermediate oil (**WTI**), a barrel of oil from Shell (**Brent**), a troy ounce of **Gold** and a troy ounce of **Silver**; these indexes are traded on the New York Stock Exchange (NYSE) in the United States of America and are described in Table 2.

**Table 2.** Commodities and unit price (in USD).

| Index | Price (USD) |
|---|---|
| **Silver** (SI = F) | troy ounce |
| **Gold** (GC = F) | troy ounce |
| **Brent** crude oil (BZ = F) | barrel |
| **WTI** crude oil (MCL = F) | barrel |

The indexes were collected for the period from 2 January 2018 to 23 May 2022, from the public Yahoo finance database: https://finance.yahoo.com/, accessed on 24 June 2022. The classic behavior of these indexes during the referred period of study can be seen in Figure 1.

Considering the COVID-19 statement made by the World Health Organization (WHO) on 11 March 2020, we deliminate three time periods, which are represented by the blue, black and red curves in Figure 1:

**Period I** from 2 January 2018 to 9 February 2020 (**before** the **WHO** COVID-19);

**Period II** from 10 February 2020 to 10 March 2020 ($M_{crisis}$ with 61 days);

**Period III** from 11 March 2020 to 23 May 2022 (**after** the **WHO** COVID-19).

Our decision to consider these time periods was due to the fact that this COVID-19 announcement was a worldwide event, with the effects of this announcement propagating throughout the world in a few days. With these time periods defined, we have an amount of quotations equal to before (**Period I**) and after (**Period III**), with 519 working days. From Figure 1, it is possible to see the performance of these indexes, before and after the announcement concerning COVID-19. With this structure in place, we can now ask the following questions:

- Is there interdependence between **Brent**, **WTI**, **Silver** and **Gold**?
- How did the contagion effect caused by COVID-19 impact this interdependence?

These two questions are answered below.

### *4.2. Results*

First, we performed an auto-correlation analysis, using the DFA method, for the entire study period, which we will refer to from here on as **All**, for Period I (**before** the COVID-19 announcement) and for Period III (**after** the COVID-19 announcement). As we performed a comparison among the indexes, we applied the returns, defined as follows:

$$r(t) = log_{10}\left(\frac{P(t+1)}{P(t)}\right) \tag{5}$$

where $P(t)$ is the price of the commodity on day $t$. A brief descriptive statistic of the return was calculated, see Appendix A. These results show that the mean values are close to zero (as expected), whereas for the Period III, the standard deviation (sd), Kurtosis and Skewness, are more distant from stationary case, if compared with Period I.

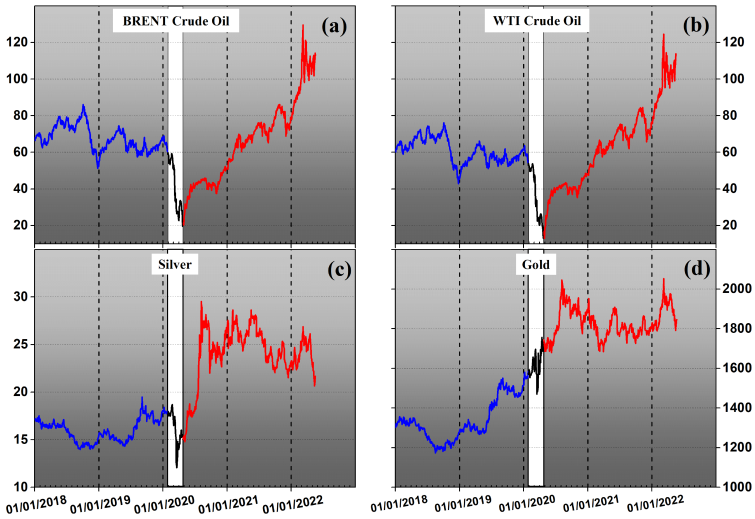



**Figure 1.** Price (USD) as a function of time for: (**a**) **Brent** crude oil (barrel); (**b**) **WTI** crude oil (barrel); (**c**) Silver (troy ounce); and (**d**) **Gold** (troy ounce).

Then, we calculated $F_{DFA} \times n$ for each commodity (**Gold**, **Silver**, **WTI** and **Brent**), and we checked the relation $F_{DFA} \propto n^{\alpha_{DFA}}$. The values of $\alpha_{DFA}$ for this case are presented in Table 3.

**Table 3.** DFA exponents for **Gold**, **Silver**, **WTI** and **Brent**. These results are reported for three time periods surrounding the WHO announcement of the COVID-19 pandemic: Before (Period I), After (Period III) and All (entire time period). The error found for $\alpha_{DFA}$ is at most $\pm 0.01$.

| Index | Before | After | All |
|---|---|---|---|
| **Gold** | 0.40 | 0.42 | 0.40 |
| **Silver** | 0.41 | 0.44 | 0.48 |
| **WTI** | 0.50 | 0.38 | 0.54 |
| **Brent** | 0.49 | 0.37 | 0.53 |

From the auto-correlation results presented in Table 3, we can see that there is a clear change in the value of the $\alpha_{DFA}$ exponent depending on the time period. The value of $\alpha_{DFA}$ increased from Period I to Period III for precious metals (within the margin of error of $\pm 0.01$). In the case of crude oil, this value decreased from Period I ($\sim$0.50) to Period III ($\sim$0.38) for both **WTI** and **Brent**. In the last column of Table 3, $\alpha_{DFA}$ for the entire time period is shown; it indicates a great proximity between **WTI** and **Brent**, with a little persistence. For precious metals, during this time period, there is an anti-persistence condition, with **Gold** being the smallest one. We can see that the $\alpha_{DFA}$ exponent changed depending on the time period being analyzed. However, this exponent cannot be used to verify the interdependence or the contagion effect caused by COVID-19.

To determine the degree of interdependence, we will now calculate the DCCA cross-correlations between all indexes. Therefore, the six possible combinations of the four commodities are presented below:

| | | |
|---|---|---|
| (a) **Brent** $\times$ **WTI** | (b) **Gold** $\times$ **Silver** | (c) **Brent** $\times$ **Silver** |
| (d) **WTI** $\times$ **Silver** | (e) **Brent** $\times$ **Gold** | (f) **WTI** $\times$ **Gold** |

The main objective of this paper is to measure the contagion effect caused by COVID-19, in addition to the aforementioned combinations of commodities and the results for each of the considered time intervals, namely, the entire time period (**All**), the time period before

the WHO COVID-19 announcement (**Before**, Period I) and the time period after the WHO COVID-19 announcement (**After**, Period III). Initially, if there is interdependence between commodity pairs, $\rho_{DCCA} \neq 0$, there can be positive (**one commodity follows the other**) or negative interdependence (**one commodity is contrary to the other**).

The results for the DCCA cross-correlation coefficient between commodities are shown in Figure 2, which shows $\rho_{DCCA}$ as a function of $n$ (days) for the six possible commodity pairs.

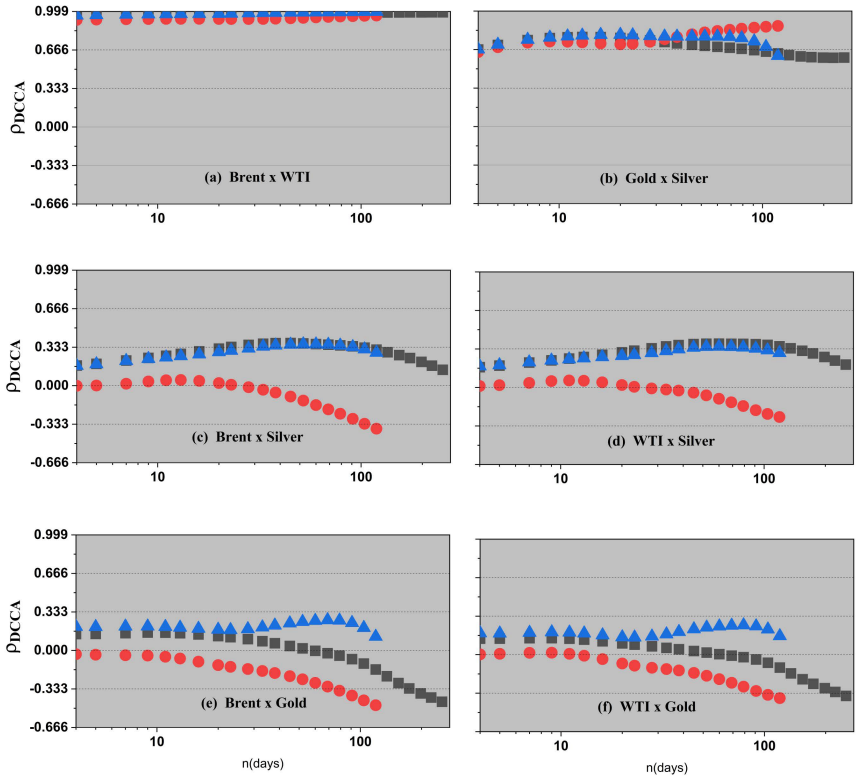



**Figure 2.** $\rho_{DCCA}$ as a function of $n$ for: (**a**) **Brent** × **WTI**, (**b**) **Gold** × **Silver**, (**c**) **Brent** × **Silver**, (**d**) **WTI** × **Silver**, (**e**) **Brent** × **Gold** and (**f**) **WTI** x **Gold**. The black symbols (■) correspond to the entire time period, the red symbols (●) correspond to **Period I**, and blue symbols (▲) correspond to **Period III**. The horizontal dotted lines correspond to the level of DCCA cross-correlation (weak, medium or strong), which can be positive or negative.

From Figure 2, for the entire time period (All, ■), we can see that interdependence between commodities exists, because $\rho_{DCCA} \neq 0$. For **WTI** × **Brent** (Figure 2a), $\rho_{DCCA} \simeq 1$, which represents a perfect DCCA cross-correlation (maximum interdependence). In the case of **Gold** × **Silver** (Figure 2b), there is strong positive interdependence up to the time scale of approximately 90 days, where there is a small decrease to a medium level of cross-correlation. The cross-correlation between crude oil and precious metals, presented in Figure 2c–f, are particularly interesting: **Brent** × **Silver** (Figure 2c) and (**WTI** × **Silver** Figure 2d): The DCCA cross-correlation coefficient is in the following range: $0 \leq \rho_{DCCA} \leq 0.333$. **Brent** × **Gold** (Figure 2e) and **WTI** × **Gold** (Figure 2f): We can identify the same type of behavior that is shown between crude oil and Silver for small time scales, but for large time scales, $\rho_{DCCA}$ tends to have negative values.

To assess the contagion effect of COVID-19 for these commodities, we applied $\rho_{DCCA}$ to each pair of indexes for Period I (●) and Period III (▲); this can be seen in Figure 2. It can be seen that, for most commodity pairs, there was an increase in the DCCA cross-

correlation if we compare Period I with Period III. To measure the contagion effect caused by COVID-19, we can apply Equation (3) to calculate $\Delta\rho_{DCCA}$ by dividing the total time into two intervals and comparing the $\rho_{DCCA}$ values. Figure 3 shows the values of $\Delta\rho_{DCCA}(n)$.

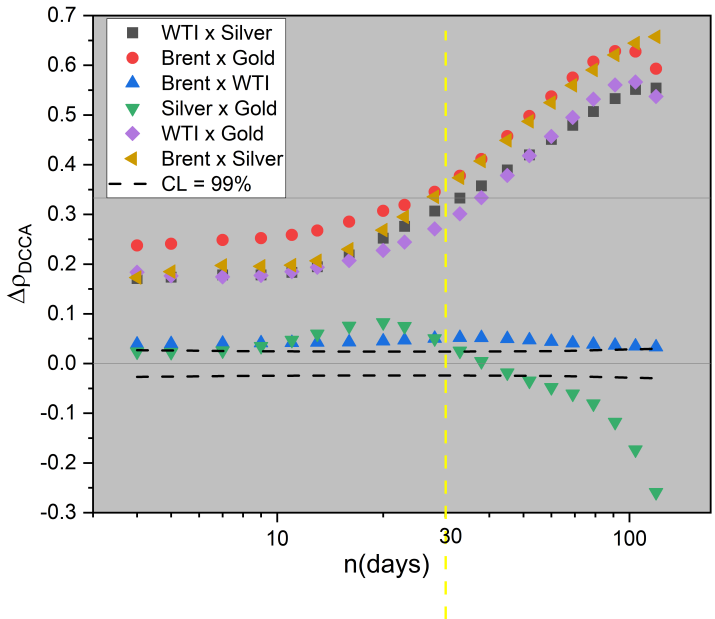



**Figure 3.** $\Delta\rho_{DCCA}$ as a function of the time scale $n$. Based on [33], dash lines denote the rejection limits of the null hypotheses at 99% of confidence level.

It can be seen that for most commodity pairs, there is an increase in the DCCA cross-correlation, because $\Delta\rho_{DCCA} > 0$. This fact indicates that the contagion effect related to COVID-19 exists; in addition, the DCCA coefficient can be used to quantify its level. An exception (negative $\Delta\rho_{DCCA}$) is found for the cross-correlation between **Gold** and **Silver** and time scales $n > 30$ days (see the vertical dashed line in Figure 3). The $\Delta\rho_{DCCA}$ values for:

**WTI** $\times$ **Silver**

**Brent** $\times$ **Gold**

**WTI** $\times$ **Gold**

**Brent** $\times$ **Silver**

showed similar dynamics, that is, $\Delta\rho_{DCCA} > 0$ for all time scales, and indicates a positive change from $n \geq 30$, which is highlighted by the yellow dashed vertical line. Notably, the relationship between **Brent** and **WTI** shows $\Delta\rho_{DCCA} \gtrapprox 0$ for all time scales, indicating that there was no contagion effect. This is because these commodities already had and continued to have an approximately perfect DCCA cross-correlation, regardless of COVID-19. The time scale $n = 30$ (days) in this context is associated with some type of stock market behavior that occurs on this time scale.

### *4.3. Discussion*

Economic and financial crises, such as the one caused by COVID-19, have had significant impacts on economic, social and environmental systems due to the many connections between these systems [44]. In view of this increase in globalization, financial markets have

become increasingly narrow and dependent on each other, with connections between the economic sector and other sectors. The analysis of energy stock markets, with an emphasis on crude oil (**WTI** and **Brent**), and traditional stock markets with an emphasis on precious metals (**Gold** and **Silver**), can help us to understand the interactive dynamics of financial transactions, serving as a reference for extrapolating this context, in addition to presenting the possibility of metals being safe havens compared to crude oil. Figure 1 shows the similarities in the behavior of crude oil price indexes.

The DFA method is suitable for auto-correlation analysis in non-stationary time series, and its exponent, $\alpha_{DFA}$, measures the persistence of these time series. For the returns, we confirm that $F_{DFA}(n) \sim n^{\alpha_{DFA}}$, and the values of the auto-correlation exponent are shown in Table 3.

However, these dynamics cannot be used to determine the level of interdependence or the contagion effect between pairs of commodities. We need a deeper and more robust evaluation metric, such as the DCCA cross-correlation coefficient, $\rho_{DCCA}$, which is presented in Figure 2. In general, this coefficient indicated that the interdependence increased after the COVID-19 crisis began, except for the commodity pair containing both precious metals.

Regarding the contagion effect caused by COVID-19, which was also analyzed in [12,21], in this paper, it was clearly measured using $\Delta\rho_{DCCA}$, as shown in Figure 3. Therefore, based on $\rho_{DCCA}$ and $\Delta\rho_{DCCA}$, we can now answer the questions posed in Section 4.1:

**(i)** We can make the following statements about the **interdependence**:

- There is maximum interdependence between **Brent** and **WTI**, because $\rho_{DCCA} \simeq 1.000$.
- There is strong interdependence between **Gold** and **Silver**, because $\rho_{DCCA} \simeq 0.666$.
- There is weak interdependence between **Brent** and **Silver** and **WTI** and **Silver**, because $\rho_{DCCA} \simeq 0.333$.
- There is no interdependence between **Brent** and **Gold** and **WTI** and **Gold**, because $\rho_{DCCA} \simeq 0.000$ for time scales $n \leq 30$ (days).

**(ii)** We can make the following statements about the **contagion effect caused by COVID-19** by comparing **Period I** and **Period III**:

- Generally, $\Delta\rho_{DCCA} > 0$, which indicates that there is a contagion effect between the considered commodities.
- For **Brent** $\times$ **WTI**, the contagion effect proved to be null, as $\Delta\rho_{DCCA} \simeq 0$; this is because these commodities had a maximum interdependence.
- For **Gold** $\times$ **Silver**, the contagion effect is null for time scales $n < 30$.

## 5. Conclusions

The main types of energy are oil, gas, electricity and energy from renewable sources (wind and solar). These energies, for the most part, are traded on the stock market and are interconnected around the world. With a global health COVID-19 crisis, at the start of 2020, the stock market was faced with a disastrous crisis. In this scenario, in this paper, we have performed a statistical analysis with respect to the concept of interdependence and also contagion effect. For this project, we chose to study the relationship between the main source of energy (crude oil) and two precious metals. Therefore, with the novelty of the application of the $\rho_{DCCA}$ and $\Delta\rho_{DCCA}$ coefficients before and during the COVID-19 crisis, the interdependence and the contagion effect were calculated. By using $\rho_{DCCA}$ and $\Delta\rho_{DCCA}$, it is possible to assess the interdependence and the contagion effect between crude oil and precious metals against the backdrop of the economic crisis caused by COVID-19. In this paper, we verified that COVID-19 had no contagion effect on the interdependence of the crude oil indexes, **WTI** and **Brent**, since they were already highly interdependent. Likewise, COVID-19 had a significant influence on the crude oil and precious metal sectors, which was evident as we identified an increase in interdependence, with a clearly positive contagion. These results show that COVID-19 imposed a restructuring in the relationship between energy (crude oil) and precious metals. Finally, our results show that COVID-19 imposed a restructuring in the relationship between the energy and precious metals sectors,

that is, there is an increase in interdependence between these commodities, measured with a positive contagion using the $\Delta\rho_{DCCA}$ coefficient. As a future application, this project can be an important basis for questions related to government policies and energy security issues, such as the war between Russia and Ukraine.

**Author Contributions:** All authors have contributed equally. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** The APC was funded by CEFAGE (University of Évora).

**Institutional Review Board Statement:** Not applicable.

**Informed Consent Statement:** Not applicable.

**Data Availability Statement:** The data is found in: https://finance.yahoo.com/.

**Acknowledgments:** G. F. Zebende thanks the Brazilian agency CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) (Grant 310136/2020-2). Rui Dias is pleased to acknowledge the financial support from Fundação para a Ciência e a Tecnologia (Grant UIDB/04007/2020). We would also like to thank Chico Mendes, rubber tapper, political activist and Brazilian environmentalist (*in memoriam*).

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

## Abbreviations

The following abbreviations are used in this manuscript:

| | |
|---|---|
| MDPI | Multidisciplinary Digital Publishing Institute |
| DOAJ | Directory of open access journals |
| WHO | World Health Organization |
| DFA | Detrended Fluctuation Analysis |
| DCCA | Detrended Cross-Correlation Analysis |
| NYSE | New York Stock Exchange |
| COVID-19 | Coronavirus disease 2019 |

## Appendix A. Descriptive Statistic

In Figure A1, we have a brief descriptive statistic of the returns for: WTI, Brent, Gold and Silver commodities traded on the New York Stock Exchange.

| | Mean | | | sd | | | Kurtosis | | | Skewness | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Index** | **Period I** | **Period III** | **All** | **Period I** | **Period III** | **All** | **Period I** | **Period III** | **All** | **Period I** | **Period III** | **All** |
| **WTI** | -0.0002 | 0.0010 | 0.0002 | 0.0085 | 0.0169 | 0.0144 | 3.05 | 10.73 | 20.71 | -0.13 | -0.70 | -1.42 |
| **Brent** | -0.0002 | 0.0009 | 0.0002 | 0.0081 | 0.0143 | 0.0124 | 3.34 | 13.14 | 17.95 | -0.27 | -1.21 | -1.56 |
| **Gold** | 0.0002 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0032 | 0.0051 | 0.0043 | 2.11 | 4.60 | 5.45 | 0.50 | -0.26 | -0.13 |
| **Silver** | 0.0000 | 0.0003 | 0.0001 | 0.0049 | 0.0097 | 0.0082 | 1.95 | 5.29 | 11.93 | -0.14 | -0.52 | -0.94 |

**Figure A1.** Descriptive statistic of the return for WTI, Brent, Gold and Silver.

## References

1. Alvarez-Ramirez, J.; Alvarez, J.; Rodriguez, E. Short-term predictability of crude oil markets: A detrended fluctuation analysis approach. *Energy Econ.* **2008**, *30*, 2645–2656. [CrossRef]
2. Dias, R.; Alexandre, P.; Heliodoro, P.; Santos, H.; Farinha, A.; Santos, M. The 2020 Oil Price War Has Increased Integration Between G7 Stock Markets and Crude Oil WTI. In *7th ERAZ Selected Papers (Part of ERAZ Conference Collection)*; Association of Economists and Managers of the Balkans: Belgrade, Serbia, 2021; pp. 13–25. [CrossRef]
3. COVID-19 Job and Income Loss Leading to More Hunger and Financial Hardship. Available online: https://www.brookings.edu/blog/up-front/2020/07/13/COVID-19-job-and-income-loss-leading-to-more-hunger-and-financial-hardship/ (accessed on 5 October 2022).
4. Dias, R.; Da Silva, J.; Dionisio, A. Financial markets of the LAC region: Does the crisis influence the financial integration? *Int. Rev. Financ. Anal.* **2019**, *63*, 160–173. [CrossRef]
5. Dias, R.; Pereira, J.; Carvalho, L. Are African Stock Markets Efficient? A Comparative Analysis Between Six African Markets, the UK, Japan and the USA in the Period of the Pandemic. *Nase Gospod. Econ.* **2022**, *68*, 35–51. [CrossRef]

6. Zebende, G.; Santos Dias, R.; De Aguiar, L. Stock market efficiency: An intraday case of study about the G-20 group. *Heliyon* **2022**, *8*, e08808. [CrossRef] [PubMed]
7. Wong, D.; Li, K.W. Comparing the performance of relative stock return differential and real exchange rate in two financial crises. *Appl. Financ. Econ.* **2010**, *20*, 137–150. [CrossRef]
8. Reboredo, J.C.; Rivera-Castro, M.A.; Zebende, G.F. Oil and US dollar exchange rate dependence: A detrended cross-correlation approach. *Energy Econ.* **2014**, *42*, 132–139. [CrossRef]
9. Da Silva, M.F.; Pereira, É.J.d.A.L.; da Silva Filho, A.M.; de Castro, A.P.N.; Miranda, J.G.V.; Zebende, G.F. Quantifying the contagion effect of the 2008 financial crisis between the G7 countries (by GDP nominal). *Phys. A Stat. Mech. Its Appl.* **2016**, *453*, 1–8. [CrossRef]
10. Forbes, K.; Rigobon, R. Measuring Contagion: Conceptual and Empirical Issues. In *International Financial Contagion*; Claessens, S., Forbes, K.J., Eds.; Springer: Boston, MA, USA, 2001; pp. 43–66. ._3. [CrossRef]
11. Guedes, E.; Ferreira, P.; Dionísio, A.; Zebende, G. An econophysics approach to study the effect of BREXIT referendum on European Union stock markets. *Phys. A Stat. Mech. Its Appl.* **2019**, *523*, 1175–1182. [CrossRef]
12. Ozturk, M.; Cavdar, S. The Contagion of COVID-19 Pandemic on The Volatilities of International Crude Oil Prices, Gold, Exchange Rates and Bitcoin. *J. Asian Financ. Econ. Bus.* **2021**, *8*, 171–179. . [CrossRef]
13. Rastogi, S.; Doifode, A.; Kanoujiya, J.; Singh, S. Volatility integration of gold and crude oil prices with the interest rates in India. *South Asian J. Bus. Stud.* **2021**, ahead-of-print. . [CrossRef]
14. Marwanti, M.; Robiyanto, R. Oil and Gold Price Volatility on Indonesian Stock Market in the Period of COVID-19 Pandemic. *J. Manaj. Dan Kewirausahaan* **2021**, *23*, 129–137. [CrossRef]
15. Mishra, A.; Ghate, K.; Renganathan, J.; Kennet, J.; Rajderkar, N. Rolling, recursive evolving and asymmetric causality between crude oil and gold prices: Evidence from an emerging market. *Resour. Policy* **2022**, *75*, 102474. [CrossRef]
16. Saijai, W.; Maneejuk, P.; Sriboonchitta, S. Contagion Effects Among Stock Markets, Treasury Bill, Petroleum, Gold, and Cryptocurrency During the COVID-19 Pandemic: A Dynamic Conditional Correlation Approach. In *Prediction and Causality in Econometrics and Related Topics*; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2022; Volume 983, pp. 514–529. ._40. [CrossRef]
17. Babecky, J.; Komarek, L.; Komarkova, Z. Financial Integration at Times of Crisis and Recovery. In *Economic Imbalances and Institutional Changes to the Euro and the European Union*; Emerald Publishing Limited: Bingley, UK, 2017; pp. 173–191. [CrossRef]
18. Andriosopoulos, K.; Galariotis, E.; Spyrou, S. Contagion, Volatility Persistence, and Volatility Spill-Overs: The Case of Energy Markets During the European Financial Crisis. *SSRN Electron. J.* **2016** . [CrossRef]
19. Gunay, S. A New Form of Financial Contagion: COVID-19 and Stock Market Responses. *SSRN Electron. J.* **2020** . [CrossRef]
20. Fang, M.; Yang, S.; Lei, Y. Residual contagion in emerging markets: Herd and alarm effects in informatization. *Electron. Commer. Res.* **2021**, *21*, 787–807. [CrossRef]
21. Ghorbel, A.; Jeribi, A. Volatility spillovers and contagion between energy sector and financial assets during COVID-19 crisis period. *Eurasian Econ. Rev.* **2021**, *11*, 449–467. [CrossRef]
22. Ghorbel, A.; Jeribi, A. Investigating the relationship between volatilities of cryptocurrencies and other financial assets. *Decis. Econ. Financ.* **2021**, *44*, 817–843. [CrossRef]
23. Malik, K.; Sharma, S.; Kaur, M. Measuring contagion during COVID-19 through volatility spillovers of BRIC countries using diagonal BEKK approach. *J. Econ. Stud.* **2021**, *49*, 227–242. [CrossRef]
24. Peng, C.K.; Buldyrev, S.V.; Havlin, S.; Simons, M.; Stanley, H.E.; Goldberger, A.L. Mosaic organization of DNA nucleotides. *Phys. Rev. E* **1994**, *49*, 1685–1689. [CrossRef]
25. Podobnik, B.; Stanley, H.E. Detrended Cross-Correlation analysis: A new method for analyzing two nonstationary time series. *Phys. Rev. Lett* **2008**, *100*, 1–4. [CrossRef]
26. Walleczek, J. *Self-organized Biological Dynamics and Nonlinear Control*; Cambridge University: Cambridge, UK, 2000. [CrossRef]
27. Zebende, G.; Filho, A.M. Cross-correlation between time series of vehicles and passengers. *Phys. A Stat. Mech. Its Appl.* **2009**, *388*, 4863–4866. [CrossRef]
28. Zebende, G.F.; Fernandez, B.F.; Pereira, M.G. Analysis of the variability in the sdB star KIC 10670103: DFA approach. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **2017**, *464*, 2638–2642. [CrossRef]
29. Filho, A.M.; da Silva, M.; Zebende, G. Autocorrelation and cross-correlation in time series of homicide and attempted homicide. *Phys. A Stat. Mech. Its Appl.* **2014**, *400*, 12–19. [CrossRef]
30. Oliveira Filho, F.; Cruz, J.L.; Zebende, G. Analysis of the EEG bio-signals during the reading task by DFA method. *Phys. A Stat. Mech. Its Appl.* **2019**, *525*, 664–671. [CrossRef]
31. Zebende, G. DCCA cross-correlation coefficient: Quantifying level of cross-correlation. *Phys. A Stat. Mech. Its Appl.* **2011**, *390*, 614–618. [CrossRef]
32. Zebende, G.; Da Silva, M.; Machado Filho, A. DCCA cross-correlation coefficient differentiation: Theoretical and practical approaches. *Phys. A Stat. Mech. Its Appl.* **2013**, *392*, 1756–1761. [CrossRef]
33. Guedes, E.; Brito, A.; Oliveira Filho, F.; Fernandez, B.; de Castro, A.; da Silva Filho, A.; Zebende, G. Statistical test for $\Delta\rho_{DCCA}$ cross-correlation coefficient. *Phys. A Stat. Mech. Its Appl.* **2018**, *501*, 134–140. [CrossRef]
34. Podobnik, B.; Jiang, Z.Q.; Zhou, W.X.; Stanley, H.E. Statistical tests for power-law cross-correlated processes. *Phys. Rev. E* **2011**, *84*, 066118. [CrossRef]

35. Kristoufek, L. Measuring cross-correlation between non-stationary series with DCCA coefficient. *Phys. A Stat. Mech. Its Appl.* **2014**, *402*, 291–298. [CrossRef]
36. Zebende, G.; Brito, A.; Castro, A. DCCA cross-correlation analysis in time-series with removed parts. *Phys. A Stat. Mech. Its Appl.* **2019**, *545*, 123472. [CrossRef]
37. Cao, G.; He, C.; Xu, W. Effect of Weather on Agricultural Futures Markets on the Basis of DCCA Cross-Correlation Coefficient Analysis. *Fluct. Noise Lett.* **2016**, *15*, 1650012. [CrossRef]
38. Vassoler, R.; Zebende, G. DCCA cross-correlation coefficient apply in time series of air temperature and air relative humidity. *Phys. A Stat. Mech. Its Appl.* **2012**, *391*, 2438–2443. [CrossRef]
39. Zebende, G.; Brito, A.; Silva Filho, A.; Castro, A. $\rho_{DCCA}$ applied between air temperature and relative humidity: An hour/hour view. *Phys. A Stat. Mech. Its Appl.* **2018**, *494*, 17–26. [CrossRef]
40. Santos, F.R.; Brito, A.; de Castro, A.; Almeida, M.; da Cunha Lima, A.; Zebende, G.; da Cunha Lima, I. Detection of the persistency of the blockages symmetry influence on the multi-scale cross-correlations of the velocity fields in internal turbulent flows in pipelines. *Phys. A Stat. Mech. Its Appl.* **2018**, *509*, 294–301. [CrossRef]
41. Brito, A.; Santos, F.R.; de Castro, A.; da Cunha Lima, A.; Zebende, G.; da Cunha Lima, I. Cross-correlation in a turbulent flow: Analysis of the velocity field using the $\rho$ DCCA coefficient. *EPL Europhys. Lett.* **2018**, *123*, 20011. [CrossRef]
42. Marinho, E.; Sousa, A.; Andrade, R. Using Detrended Cross-Correlation Analysis in geophysical data. *Phys. A Stat. Mech. Its Appl.* **2013**, *392*, 2195–2201. [CrossRef]
43. Inacio, C.M.C.; David, S.A. Price Dynamics and Measuring the Contagion between Brent Crude and Heating Oil (US-Diesel) Pre and Post COVID-19 Outbreak. In *Proceedings of the ITISE 2022*; MDPI: Basel, Switzerland, 2022. [CrossRef]
44. Paitan, C.P.; Verburg, P. Methods to Assess the Impacts and Indirect Land Use Change Caused by Telecoupled Agricultural Supply Chains: A Review. *Sustainability* **2019**, *11*, 1162. [CrossRef]

## 3.2 *Mercado de commodities agropecuárias: uma análise bibliométrica*

**Equilibrium. Quarterly Journal of Economics and Economic Policy**
**Volume 18 Issue 4 December 2023**
p-ISSN 1689-765X, e-ISSN 2353-3293
www.economic-policy.pl

**REVIEW ARTICLE**

**Citation:** Santana, T. P., Horta, N. R., Chambino, M. R., Dias, R. M. T. S., Vasconcelos, R. N., Filho, A., M. S., & Zebende, G. F. (2023). Interdependence and contagion effects in agricultural commodities markets: A bibliometric analysis, implications, and insights for sustainable development. *Equilibrium. Quarterly Journal of Economics and Economic Policy*, *18*(4), 907–940. doi: 10.24136/eq.2023.029

Contact to corresponding author: Thiago Pires Santana, tpsantana@uefs.br

Article history: Received: 11.05.2023; Accepted: 15.11.2023; Published online: 30.12.2023

**Thiago Pires Santana**
*State University of Feira de Santana, Brazil*
*orcid.org/0000-0002-6353-1293*

**Nicole Rebolo Horta**
*Instituto Politécnico de Setúbal, ESCE-Escola Superior de Ciências Empresariais, Portugal*
*orcid.org/0000-0003-0879-6691*

**Mariana Chambino Ramos**
*Instituto Politécnico de Setúbal, ESCE-Escola Superior de Ciências Empresariais, Portugal*
*orcid.org/ 000-0002-9444-3333*

**Rui Manuel Teixeira Santos Dias**
*Instituto Politécnico de Setúbal, ESCE-Escola Superior de Ciências Empresariais, Portugal*
*orcid.org/0000-0002-6138-3098*

**Rodrigo Nogueira Vasconcelos**
*State University of Feira de Santana, Brazil*
*orcid.org/0000-0002-1368-6721*

**Aloísio Machado da Silva Filho**
*State University of Feira de Santana, Brazil*
*orcid.org/0000-0001-8250-1527*

**Gilney Figueira Zebende**
*State University of Feira de Santana, Brazil*
*orcid.org/0000-0003-2420-9805*

# Interdependence and contagion effects in agricultural commodities markets: A bibliometric analysis, implications, and insights for sustainable development

**JEL Classification:** *C80; C58; Q17; F65; G14*

**Keywords:** *bibliometric analysis; financial econometrics; agricultural commodities interdependence; contagion effect*

**Abstract**

**Research background:** The global interdependence of financial markets due to globalization has resulted in standardized trading conditions for agricultural commodities, reducing the advantages of portfolio diversification. Recent events between 2020 and 2023 underscore the growing importance of real-time information for investors to make informed decisions in this interconnected financial landscape.
**Purpose of the article:** This article aims to conduct a bibliometric review of the literature about market interdependence. We investigate the contagion effect on agricultural commodities and identify commodities and methods used in the most cited publications from 1997 to 2022.
**Methods:** A bibliometric analysis was developed, for this, the SCOPUS database was used, sorting with Rayyan, Excel, and finally, the Bibliometrix/R-project to extract bibliometric information from the database.
**Findings & value added:** The analysis highlights the prominent role of certain countries in contributing to scientific research on this topic, with China and the United States being leaders, collectively producing 24.57% of all publications in the examined periods. The research underscores the global concern for sustainable development, emphasizing the scientific growth linked to this topic and its intersection with energy sources. Unlike other bibliometric studies, this research consolidates relevant methodologies employed in analyzing interdependence and contagion effects in agricultural commodities over the past decades. Additionally, it identifies the most studied commodities in these works. As the world grapples with the challenges of market interdependence, particularly in the wake of recent events between 2020 and 2023, this study underscores the importance of real-time information for informed decision-making. The study suggests a shift towards cleaner and renewable energy sources in the coming years, anticipating increased investments in research and development.

## Introduction

The economic system is a structure formed by multiple agents interacting with each other and presenting their collective properties, such as self-organization and self-regulation (Mantegna & Stanley, 1999). In this sense, we realize that one economic situation is associated with others and, in addition, is linked to social, environmental, scientific, and political varia-

bles, exercising a relationship of dependence or independence (Despard *et al*., 2020). Technological development, the internet, and social media have accelerated the process of globalization and worldwide connectivity, enabling the real-time transmission of information. In turn, globalization has broken down international investment barriers, leading to increased interdependence (integration/correlation) among different countries and regions (Santana *et al*., 2023), making socio-economic systems increasingly chaotic and susceptible to the transmission of crises, among other factors (Grass *et al*., 2019). Understanding these relationships and monitoring their dynamics enables diversifying investment, structuring, and planning (Dias *et al*., 2021).

The interdependence between markets or the indexes representing them is understood as a relationship, analysis of correlation, integration, or coupling between them (Bertero & Mayer, 1990; Guedes *et al*., 2019; Pietrzak *et al*., 2017; Reboredo *et al*., 2014; Santana *et al*., 2023; Silva *et al*., 2015), where a change in behavior or interference in one system can disturb the dynamics of another system. Because of this, the contagion effect is understood as the effects' transmission of a financial or economic disruption (crash or volatility) from one sector, region, or market to another (Bashir *et al*., 2019; Forbes & Rigobon, 2001; Santana *et al*., 2023; Silva *et al*., 2016). The interdependence among markets is a well-acknowledged characteristic during stable times. However, it becomes less favorable during crises due to the potential for risk transmission (the contagion effect) and market failure, which means that even in smaller sectors, market shocks can propagate, leading to a systemic and global crisis (Bashir *et al*., 2019; Dias *et al*., 2021; Guedes *et al*., 2019; Reboredo *et al*., 2014; Silva *et al*., 2015).

Both globally and locally, society has constantly gone through various crises caused by the most diverse natures: energy and oil, 1980; Brazilian energy, 2001; the USA housing market, 2008; and recently we have the world economic recession, 2018; COVID-19, 2020; war between Russia and Ukraine, 2022 and war between Hamas and Israel, 2023 (Fiszeder & Małecka, 2022; Kramarova *et al*., 2022; Liu *et al*., 2021; Svabova *et al*., 2021). These instabilities generate numerous social and environmental problems, such as inflation, hunger, unemployment, food insecurity, shortages, deforestation, inadequate land exploitation, and desertification (irrational use of natural resources), problems that we can associate with the pillars of sustainability and their interconnections (Despard *et al*., 2020; Parra Paitan & Verburg, 2019; Santana *et al*., 2023). Faced with the impact that the dy-

namics of interdependence or contagion have on understanding financial and economic markets and delineating investment strategies, investigations that contribute to and extend research related to this theme are considered of great relevance.

In the global scenario, agricultural commodities play a crucial role in sustainable equilibrium, given their allocation for human and animal food production, energy generation, pharmaceuticals, and other industrial inputs. Biofuels represent a strategy for the energy transition (shifting from more polluting to less polluting and renewable energy production). However, some studies express concerns regarding sustainability and the social, environmental, and economic balance (Herwartz & Saucedo, 2020; Pimentel *et al*., 2009).

Notably, the agricultural sector gains prominence on the world stage as globalization introduces instability in a market player, potentially impacting food and energy production. The significance of this sector and the concern for its balance align with the Sustainable Development Goals proposed by the United Nations, including objectives such as Poverty Eradication, Zero Hunger and Sustainable Agriculture, Affordable and Clean Energy, Life Below Water and On Land, Action against Global Climate Change, among others.

Knowing what has already been produced by society is the first step towards continuity, development, adaptation, regulation, and application of scientific knowledge, especially when it comes to constantly changing phenomena subject to many interferences, such as economic relations. Faced with the questions raised, numerous methods can be combined to clarify a scientific investigation. Among them, we can mention bibliometrics. Bibliometric analysis represents one of the most consolidating and practical approaches to building the scientific memory of a given object of study.

In general terms, the bibliometric analysis represents an essential reference source for developing new research or even deepening scientific fields (Santana *et al*., 2021; Vasconcelos *et al*., 2020). The bibliometric techniques can be understood as a quantitative method to measure the interrelationships and impacts of publications within a given area of research using mathematical and statistical tools (Lajeunesse, 2016; Linnenluecke *et al*., 2020; Santana *et al*., 2021). This approach brings as a differential the possibility of describing the scientific production evolution in quali-quantitative terms. This review approach frequently addresses the scientific production

evolution by countries, authors, institutions or groups, and journals (Beckmann & Persson, 1998).

Although there are reviews in the literature that deal with themes associated with economic processes and their implications in general terms, productions that specifically deal with agricultural commodities in the light of interdependence or the effect of contagion are scarce in the literature. Some bibliometric studies associated with economics can be found, addressing the most cited journals in economics (Beckmann & Persson, 1998), field normalization and citation impact time in economics (Bornmann & Wohlrabe, 2019), the interference of COVID-19 on publications in economics (Bürgi & Wohlrabe, 2022), green economy focused on economic and environmental factors (Rusydiana *et al*., 2022) and the accounting literature since the financial crisis of 2008–2009 (Sampaio *et al*., 2022).

In this sense, we provide in this paper not only a brief bibliometric review of the current scientific production in the agricultural commodities market, but also examine the literature that uses indexes of agricultural commodities to know what has been produced in the world literature on market interdependence in the context of agricultural commodities and to identify commodities and methods used in the publications most cited over the decades.

To achieve the article's aims, some questions were drawn that guided the construction of this research: What is the trend in the number of publications on interdependence or contagion effects in the agricultural commodities market? Which countries have published the most studies on interdependence or the contagion effect in the agricultural commodities market? What are the most cited publications on interdependence or contagion effects in the agricultural commodities market? Which authors have published the most about interdependence or contagion effects in the agricultural commodities market? Which journals have published the most studies on interdependence or the contagion effect in the agricultural commodities market? Which commodities are addressed in studies of interdependence or contagion effects on the agricultural market? What methods are applied in the studies to identify interdependence or contagion effects on the agricultural commodities market? What are the scientific perspectives on the analysis of interdependence and contagion effects in agricultural commodities concerning the sustainability discourse?

This study investigates a scientific gap, presenting the bibliographic framework regarding interdependence and contagion effects on agricultur-

al commodities. Unlike other bibliometric studies, we identify the applied methods and the commodities studied based on the most cited documents. Furthermore, we aim to recognize the direction this scientific field is taking in response to the demands of a more sustainable world. Therefore, it is not merely a retrospective view, but an analysis that will provide new guidelines for research.

The paper comprises five sections. Section 1 contains the introduction. A literature review is presented in Section 2. Section 3 details the materials and methods, while Sections 4 and 5 present and discuss the findings. Section 6 provides the conclusion.

## Literature review

According to Mantegna and Stanley (1999), contemporary economic systems are inextricably linked due to their vast dependence on various elements. This interconnection creates a globally complex and interdependent economic system where events in one part of the world can have significant impacts on other regions (Bashir *et al*., 2019; Guedes *et al*., 2019; Silva *et al*., 2016).

Advances in information technology and communications have shortened distances and accelerated the dissemination of information (Ajide & Dada, 2022; Haldar *et al*., 2023). It creates an environment where economic decisions are influenced by real-time events anywhere in the world, increasing the complexity of economic systems. Recent articles, such as Fiszeder and Małecka (2022) and Pietrzak *et al.* (2017), have worked on these aspects.

Studies like those of Dias *et al.* (2021), Fiszeder and Małecka (2022), Pietrzak *et al*. (2017), and Santana *et al.* (2023) show that the integration of economies and the free flow of capital and investment have affected local and global economies. It reaffirms the interpretation that economic policies, financial crises, pandemics, and climate events in one country affect others, implying vulnerability and risk transmission (contagion effect).

Agricultural commodities are essential for sustainable global balance, destined for human and animal food production, energy production, medicines, and other industrial inputs. Some economic studies have addressed discussions about food security. Herwartz and Saucedo (2020) discuss volatility in the prices of food, oil, and agricultural inputs, showing the exist-

ence of volatility transmission and impacts on biofuel production. Pimentel *et al*. (2009) analyze the competition between food and biofuel production, exposing that the global population increase has intensified the demand for food and biofuels, aggravating malnutrition worldwide. Hamulczuk and Pawlak (2022) address the competitiveness of the global food industry and prove that the globalization of the economy positively impacts international competition.

It is crucial to develop resilient and sustainable management systems considering complexity and global dynamics to mitigate risks. It includes economic collaboration among various countries, investments in infrastructure, sustainable practices, and security policies (Beusch *et al*., 2022; Ortiz-Martínez *et al*., 2023). Effective management of these challenges requires global cooperation, sustainable practices, and the development of responsible strategies to reduce vulnerability.

Responsible and sustainable management, as advocated by the United Nations (2023), must "live today if we want a better tomorrow, meeting present needs without compromising the possibilities for future generations to meet their needs." According to them, balancing economic growth, environmental protection, and social inclusion is necessary. This concept and perspective can be identified in the sustainable development goals proposed in 2015: no poverty; zero hunger; good health and well-being; quality education; gender equality; clean water and sanitation; affordable and clean energy; decent work and economic growth; industry, innovation and infrastructure, reduced inequalities; sustainable cities and communities; responsible consumption and production; climate action; life below water, life on land; peace, justice, and strong institutions; partnerships for the goals.

The energy transition and sustainable development face various challenges related to energy production. Although biofuels are considered a cleaner alternative than fossil fuels, their production and use can have significant environmental and social impacts. Recent articles on the energy transition from reputable sources should be cited here.

Large-scale biofuel production can have significant social impacts, including the displacement of local communities, competition for resources, and a potential increase in food prices. It can affect food security and the well-being of vulnerable communities. Biofuel production from food crops creates competition between fuel and food production (Gasparatos *et al*., 2022; Pimentel *et al*., 2009; Tokarchuk *et al*., 2022). It increases food prices

and puts more pressure on agricultural resources, especially during global food scarcity.

Addressing the challenges of producing cleaner energy requires a holistic approach involving the complexity demanded by globalization. The transition to sustainable biofuels must be carefully planned and implemented, considering environmental, social, and economic issues to ensure a cleaner and more resilient energy future.

In recent years, several studies have gathered and analyzed scientific production to identify elements that can positively influence the dynamics of global subsistence. These studies have used numerous methodologies, including bibliometrics, to answer their research questions.

Despite being a methodology recently driven by the development of applications and software, there are still few studies of economic nature. However, recently, studies such as those by Liu *et al*. (2021), Rusydiana *et al*. (2022), Bornmann and Wohlrabe (2019), Bürgi and Wohlrabe (2022), and Sampaio *et al*. (2022) have emerged, showing the increasing worldwide scientific production in various fields. Additionally, the scientific cooperation network has expanded and broken geographical boundaries, making relevant articles more likely to be cited. Despite the growth in the publication rate, bibliometric studies are still underexplored, especially considering specific topics in economic literature, such as independence and contagion effect. Another aspect that needs further exploration is bibliometric studies that combine with other research techniques and focus on an intra-documentary analysis, seeking to identify the main contributions of the investigated literature base.

## Material and methods

This paper uses a bibliometric approach to analyze the literature on market interdependence. In addition, other topics, such as the contagion effect with agricultural indices associated with economic, social, environmental, and political perspectives at a given historical moment (1997–2022), were analyzed.

In our article, the bibliometric method was used as an approach to examining the state of science through the production of scientific literature (Galindo-Rueda & López-Bassols, 2022) to offer possibilities for quantitative and qualitative analysis of the countries' scientific production of

groups, institutions, authors, and journals (Mlambo-Thata, 2010; Vasconcelos *et al*., 2020).

The investigation development can be identified from Table 1, which contains the guiding questions, analyses, and data that led to this investigation.

The methodological process to answer the research questions was developed in two stages. The first consists of building the database through identification, selection, and inclusion (see Figure 1). The SCOPUS database was used as a data source because it is comprehensive and multidisciplinary, with a more significant number of abstracts and citations (Elsevier, 2022). The second stage consists of processing and analyzing data for all articles or the subcategories indicated in Table 1, and its dynamics can be understood in Figure 1.

The first stage includes identification based on keywords, selection based on reading titles and abstracts, and the inclusion of texts for complete analysis. The second stage includes a data processing flowchart via Bibliometrix, analysis of whole texts, generation of results with an evaluation of answers, organization, structuring, and analysis.

*First stage*

The first stage began with a preliminary search in March 2022 in the SCOPUS database on order to identify the most commonly used terms and, thus, choose the keywords to compose the search, namely: ("agricultural commodities" OR "agriculture index" OR "livestock index" OR "agricultural index" OR "commodities agriculture" OR "commodities livestock") AND ("Market Integration" OR "Market Interdependence" OR "Risk transmission" OR "contagion" OR "Overflow" OR "Spillover" OR "Telecopling"). After defining the search terms, 145 articles were identified using the filters: only articles, texts in English, Spanish, or Portuguese, and review articles were excluded because they did not answer the guiding questions.

The selection of documents was developed as follows: search in the SCOPUS database based on the search terms, export to the Rayyan application (https://www.rayyan.ai/) in which the screening of duplicates was carried out $D$, and reading the titles and abstracts. Subsequently, the search in the SCOPUS base was returned, excluding a duplicate, $D = 1$, and the incompatible texts identified from reading the titles and abstracts $AT$ ( $AT =$

17 these documents were excluded because they did not fit the objective of this study or did not answer the research questions). A total of 127 documents were admitted (see Table 2 and Table S1). In this stage, there was a concern about the accessibility of the complete texts, given the need to answer the questions "What commodities are addressed in studies of interdependence in the agricultural market?" and "What methods are applied in studies to identify interdependence in the agricultural commodities market?" and the associated sub-criteria are shown in Table 1. By consensus, the researchers decided to use a sample of 20% of the most cited articles per decade, i.e., an 80% percentile (see Tables 2, 3, 4 and 5).

Figure 1 details the search and selection stage of the scientific articles included in this study, adapted from the Prisma-Scr Flowchart (Prisma-Scr, 2022).

The construction of the database followed the process shown in Figure 1 with the identification of $X$ documents, the exclusion of $D$ duplicates, and $AT$ texts that did not fit this investigation after reading titles and abstracts. The number of documents included in $N$ can be expressed by the equation $N = X - D - AT$, the first stage's flowchart (see Figure 1), with the number of articles excluded and the reason for exclusion.

*Second stage*

Based on the questions in Table 1, bibliometric analysis was used to do the main analysis of the database. This entire step was initially developed with the support of Bibliometrix /R-project (Aria & Cuccurullo, 2017) and Excel/Microsoft because it has descriptive analytical functions that support this research. Furthermore, concerning bibliometric analysis, the Bibliometrix/R-project has been used by a growing number of publications (Lajeunesse, 2016; Rusydiana *et al*., 2022) and has an easy-to-use free version that allows you to import data directly from SCOPUS, among other statistical and visualization advantages (Lajeunesse, 2016; Linnenluecke *et al*., 2020).

With the Bibliometrix/R-project, tables and graphs were generated and analyzed to answer the research questions clearly and objectively. The development of this stage can be understood from Figure 1.

Figure 1 illustrates the development of the second stage: database processing with Bibliometrix/R-project, analysis of possible answers to research questions, clarity of results, extraction, and reorganization of infor-

mation, and finally, discussion of results. Regarding the 20% of the most cited articles per decade that supported questions 3.6 and 3.7 of the next section, they were carried out independently and blindly by two researchers, and they agreed upon the divergences.

The following section presents the results, analysis, and discussion. The arguments and reflections presented in this article are related to the research questions, objectives, results found, authors' expertise, and literature.

## Results

In this section, we seek to present and describe the results according to the questions that guided this study. General information about data, keywords, authors, collaboration, and types of documents can be seen in Table 2.

*What is the trend in the number of publications on interdependence or contagion effects in the agricultural commodities market?*

Figure 2 shows the growth of the annual scientific production from 1997 to 2022, corresponding to the 127 articles that comprise this study's database. In black, we have the number of articles published annually, and in red, the accumulated production of articles. The first article dates from 1997, with another production in the next ten years. The number of publications has increased sharply since 2015 and in the last decade (with a production of 94 articles).

The results show that scientific production has been more significant in the last six years than in any other period. It is clear from the slope of the cumulative production curve, which shows a function with exponential characteristics and properties. From 2020 to 2021, there was a slight drop in the number of scientific papers published during this period, with 20 articles published in 2020 and 16 articles published in 2021.

*Which countries have published the most studies on interdependence or the contagion effect in the agricultural commodities market?*

The thematic map (see Figure 3) shows the countries that published the most on the topic discussed in this study. The blue color gradient indicates the regions that published articles, so the stronger tones indicate a more outstanding scientific production, while the lighter tones are minor. Gray-shaded regions represent negligible scientific production or have not been identified in this database. It is worth noting that Figure 3 shows the countries linked to the publications and that the production accounting is assigned to all countries involved in production.

The map also shows how little some regions of the world discuss the topic, opening space for scientific development in this area, especially in Russia, because, despite its economic influence and representativeness, it was impossible to identify linked scientific production.

*What are the most cited publications on interdependence or contagion effects in the agricultural commodities market?*

The most cited documents throughout the period studied, the top 10, are shown in Figure 2, which shows us a set of documents between 2011 and 2019, on the left and right, the number of citations. In addition, it is possible to identify in the exact figure the primary author and the journal that published the text. There is significant diversity in the authorship of the top 10, except for the fifth and eighth articles, which belong to the same author. The ten most cited articles are well distributed from 2011 to 2019, that is, one article in 2011, one in 2012, one in 2013, one in 2014, one in 2017, three in 2018, and two in 2019. Throughout this period, there was an average of 163.4 citations with a sample standard deviation of ± 79.6.

*Which authors have published the most about interdependence or contagion effects in the agricultural commodities market?*

Figure 2, on the upper and left, shows the authors who published the most on interdependence or the effect of contagion in the agricultural commodities market (in descending order of those who contributed the most to the literary area under analysis), with an average productivity of 3.1 publications per author. From the results obtained in Figure 2, the au-

thors Hernandez and Bouri are the most productive. The productions of Hernandez and Bouri represent the authorship of four articles each, followed by the same number of publications by authors Ji, Kang, Nguyen, Roubaud, Shahzad, Umar and Yoon, who contributed three articles.

*Which journals have published the most studies on interdependence or the contagion effect in the agricultural commodities market?*

The journals that most contributed to the publication of articles that analyze the phenomenon of interdependence or contagion in the agricultural commodities market are identified in Figure 2, on the left and below.

In median terms, the ten journals shown in Figure 2 have an average publication of 4.6 articles over the analyzed period. It is possible to notice that most magazines identified as more productive focus on themes associated with economy, commerce, business, or finance, accumulating a volume of more than 73.9% of the articles published.

*Which commodities are addressed in studies of interdependence or contagion effects on the agricultural market?*

A sample with a minimum rate of 20% of the most cited articles per decade was defined among the authors, admitting 28 documents (see Table 3). In Table 4, the list of agricultural commodities with the most articles indexed by decade can be seen: 1997–2006 (the first decade), 2007–2016 (the second decade), and 2017–2022 (the third decade). Table 5 presents the frequency with which the commodity was studied in each period.

The results obtained for the first decade can be seen in Table 4. Rice and wheat were mentioned more frequently in the literature (two articles), followed by the study of cotton, corn, and soybeans (one article). In addition, it can be noted that in this decade, the article published in 2004 had a much higher number of citations than the article produced in 1997.

In the second decade, the study of the present theme gained relevance in analyzing the commodities corn and wheat, which integrated the sample of seven articles. Soybean was analyzed in three articles and sorghum in two studies. Barley, cotton, rice, and sugar, on the other hand, were part of only one article.

We can see in the third decade that all these commodities were present in at least one sample of the analyzed articles, standing out with their pres-

ence in 19 articles, except barley and sorghum, which were not studied in any article in the third decade. Prominently, corn was analyzed in 18 articles (95%), wheat in 16 (84%), soybeans in 15 (79%), cotton in 10 (53%), sugar in 9 (47%), coffee in 8 (42%), cocoa in 7 (37%), and rice in 6 (32%). Table 5 summarizes the frequency with which commodities were studied, emphasizing corn.

Overall, we analyzed 26 differentiated commodities in 28 articles. We can highlight the five commodities whose analysis in the context of the study of interdependence and the effect of contagion were more relevant, namely, corn (93%), wheat (89%), soybean (68%), cotton (43%) and sugar (36%). These five commodities were analyzed in articles during the three decades, and their analysis showed an increasing trend.

*What methods are applied in the studies to identify interdependence or contagion effects on the agricultural commodities market?*

Table 6 presents the methods used to identify interdependence and the effect of contagion in the most cited articles for decades. We emphasize that the methods referred in this study consist of procedures declared in the selected articles and can be understood as the most concrete steps. In restricted terms of general explanation and less abstract, a concept that can revolve around the most abstract notions of methodology, model, or technique was present.

In the first decade, the article by Tahir and Riaz (1997) applies the Ravaillon methodology to study the integration between agricultural commodities selected for the sample. Later, in 2004, the article developed by Huang *et al*. (2004) applied the Engle-Granger cointegration methodology to analyze the integration of Chinese markets.

In the second decade under analysis, in 2011, the author Du *et al*. (2011) used a Bayesian methodology (SVMJ model) to study the contagion effect. Reboredo (2012) studied co-movements using various models of copulas. In the following year, Nazlioglu *et al*. (2013) examined the volatility transmission between the prices of selected agricultural commodities, applying the causality test in the variance test and impulse response functions to daily data (CIV-IRF). These are the most cited articles of the second decade.

In 2014, Beckmann and Czudaj (2014) applied for the GARCH-in-mean VAR model. In the same year, Baquedano and Liefert (2014) applied an error correction model (SEECM) to identify cointegration. Finally, Mensi *et*

*al.* (2014) and Hernandez *et al*. (2014) used the VAR-BEKK-DCC-GARCH models to analyze possible market links.

In the third decade, in the year 2017, the authors Arnade *et al*. (2017) used the VAR-ECM method to analyze the economic phenomenon of integration. In turn, Kang *et al.* (2017) applied the DECO-GARCH model to analyzing the contagion effect.

Zafeiriou *et al.* (2018) examines the relationships of crude oil–corn–soybean prices with ARDL cointegration approach. Saghaian *et al*. (2018), who, like the authors Mensi *et al*. (2014) used the BEKK-MGARCH method. Shahzad *et al.* (2018) and Ji *et al.* (2018) used the same method, namely Co-VAR, to study the contagion effect. Luo and Ji, (2018) and Ji *et al.* (2019) analyze the connectivity characteristics of variable volatility combined the multivariate heteroscedastic autoregressive model (HAR) with the DCC-GARCH model. Hernandez *et al*. (2019), chose to use the CQ approach to examine the effect of extreme quantiles of returns between commodities.

Bonato (2019) relied on a volatility model, the Beta GARCH model performed by Hansen *et al.* (2014). Barbaglia *et al.* (2020) and Dahl *et al.* (2020) in that same year, studied the contagion effect using the vector autoregressive model (VAR) and the EGARCH, respectively. Su *et al.* (2019) chose to use a bivariate autoregressive vector to analyze dynamic causal relationships. Yip *et al*. (2020) employed the fractionally integrated VAR (FIVAR) model to capture the dynamical patterns of volatility spillover effects.

More recently, Umar *et al.* (2021) published paper applying different techniques, Granger test methods with index created by Diebold and Yilmaz (2009) and TVP-VAR (time-varying parameter with vector autoregressive), this last method is the same one applied by Bouri *et al.* (2021). In the same year, he published an article with the objective for analyzing the overflow between agricultural commodities and oil using the Wavelet Coherence method with an index by Diebold and Yilmaz (2009). Later, in 2022, Tiwari *et al.* (2022) applied the Quantile Vector autoregressive to develop his research.

*What are the scientific perspectives on the analysis of interdependence and contagion effects in agricultural commodities concerning the sustainability discourse?*

The analysis of interdependence and contagion effects in agricultural commodities concerning sustainability is a complex field that involves various scientific perspectives. The integration of these perspectives can pro-

vide an understanding of the collective dynamics of markets, thereby contributing to the formulation of more sustainable policies and practices.

The data analysis suggests a correlation between the rise number of publications, the countries with the highest publication rates, the most cited articles and authors, the journals with the highest publication rates, and the most investigated commodities. Upon examining these results, it becomes evident that there is an increasing worldwide interest in sustainable development and achieving a balance between our society's social, economic, and environmental aspects.

This scientific scenario demonstrates how agricultural production is crucial in global food supply and biofuel production. The dualism and competition for inputs between these markets pose a challenge to be overcome. The increasing demand for food and biofuels often results in conflicts, leading to agricultural intensification, extensive land use, and environmental pressures. The competition for resources, such as land and water, exacerbates these issues, highlighting the need for sustainable approaches to reconcile food and biofuel production, minimizing negative impacts on the environment, economy, and society.

## Discussion

We discuss below the descriptive and analytical aspects visualized in the results achieved. According to an analysis of the publication's development (see Figure 2) 94 articles (or 74% of the total number of publications) were released between 2017 and 2022.

In the first decade, there was an average production of 0.2 articles. In the second decade, there was an average production of 3.1 articles per year, while in the third decade, the average production of articles was 15.7.

Even though there was a decline in scientific output from 2020 to 2021 (likely due to the global crisis brought on by COVID-19), it can be seen from the evolution of the number of publications, particularly in recent years, that there is a trend of growth of publications about the theme by 2022. It is like the growth trends seen before the pandemic.

The distribution of scientific production is concentrated in a few countries, mainly: China, the USA, India, France, Australia, Italy, Brazil, Greece, the UK, and Germany (see Figure 3). The first three are also the countries with the largest population in the world, and most have significant eco-

nomic representation in the world. They are part of the G20, and China, the USA, France, and the UK participate in the Permanent Council of the UN (United Nations Organization). The correspondence between scientific production and development is evident in the representativeness of the countries that have published the most and their expression in the economic, political, and social world (Despard *et al*., 2020; Guedes *et al*., 2019).

In the articles that make up this database, the three most cited documents are in the journal Energy Economics (https://www.sciencedirect .com/journal/energy-economics), and 70% of the most cited articles are concentrated there. In addition, the three most cited articles have an average of 272 citations, with the first one dating from 2017, the second from 2011, and the third from 2013. While the ten most-cited articles have an average of 163 citations per document (see Figure 2).

There is no clear trend toward older publications receiving more citations, as shown by the distribution of the most frequently cited articles by date.

Still, among the most cited documents, we have the authors who published the most (see Figure 2),

Authors Hernandez and Bouri despite having the largest output (see Figure 2), have no documents that rank among the most frequently cited documents examined. Figure 2 demonstrates that if we consider the 3 articles published per year from 1997 to 2022, the average production per author is low. According to Figure 2, the most productive authors are associated with the most diverse nations.

Figure 2 shows that Energy Economics has a greater number of publications on the object of study, indicating a particular scientific relevance in studies that address agricultural commodities and energy. It is believed that the concentration of these studies in journals with an economic bias is somehow associated with the production of biofuels (Pimentel *et al*., 2009; Quintino *et al*., 2021; Rosales-Calderon & Arantes, 2019; Rusydiana *et al*., 2022).

A sample of 20% of the articles that received the highest citations throughout the period was gathered to identify the agricultural commodities and the research methodologies employed, as was described in the preceding section (see Table 3).

Table 4 lists the commodities discussed in the most frequently cited studies for each period under analysis. As a result, we can see that the

commodities needed to produce food for humans and animals are commonly used in the articles under study.

Furthermore, the association between energy and agricultural commodities in the most widely read and cited publications suggests concern for both agricultural production and energy-related issues (biofuels). In particular, corn, wheat, and soybeans because they are globally popular foods and the source of biofuels.

Table 6 also summarizes the most frequently mentioned studies and research techniques for each period.

In general, the non-co-occurrence of the analysis methods over the years shows that no universally accepted method contemplates the absolute universality of the phenomenon and that new methods, divergent or complementary, may arise with the development of research in this area.

The discussion of the results obtained in this study presents a direction for research involving agricultural commodities (food) and energy sources. In this sense, there is a global concern about more sustainable economic policies, efficiency, and rational use of environmental resources, that is, equitably balancing social, economic and environmental needs, given that the planet is increasingly interconnected and the instability of one region is spreading to others faster and faster (Mantegna & Stanley, 1999; Parra Paitan & Verburg, 2019).

As we face the ever-growing demand for a more balanced structure among society, the environment, and the economy, we must focus on interdependence, contagion effect, and sustainability. It is particularly crucial when it comes to the energy transition process. Investing in scientific solid production and research can pave the way towards a more equitable and sustainable future. Let us prioritize this vital work and create a better world for ourselves, our children, and future generations. Balcerzak *et al*. (2023) emphasize that sustainability is related to overcoming the challenges of the energy transition and obtaining renewable sources and socio-economic balance. In general, it is anticipated that there will be increased investments in research promoting cleaner energy production alongside socio-economic stability in the coming years or decades, as evidenced by studies discussing waste utilization (Tokarchuk *et al*., 2022).

## Conclusions

This study assumes that the world is a complex system that has become increasingly globalized, reducing borders and bringing cultures, economies, and policies closer together. In the same way, through the perspective of sustainability, we relate environmental, social, and economic issues. In this paper, we identify the main patterns of literature production associated with market interdependence, the effect of contagion using agricultural commodity indices, and the commodities and methods used in the most cited publications over the decades. Intending to carry out a bibliometric mapping, we outlined some questions (see Table 1) that were answered in the previous sections.

We conclude from the results and discussions that the scientific production concerning the theme discussed in this article has grown faster and faster in recent years, mainly since the financial crisis of 2008, without concentration among the most cited and productive authors. However, there is a direction for discussion between agricultural commodities and energy. In addition, the most-cited documents are published in magazines focused on economics, finance, or business.

Because of their large populations and high energy consumption, the world's two most significant powers, China and the USA, are the greatest producers of knowledge on the subject, with 24.57% of the publications of articles on the world from 1997 to 2022. Supplies like corn, wheat, soy, cotton, and sugar were the most studied products over the analyzed period (corn is highlighted as being present in 93% of the articles).

The numerous approaches taken to study the interdependence and effect of contagion on the financial markets, particularly in the commodities markets, must also be emphasized. In this field we also identify opportunities for new or improved techniques development.

When used to investigate financial phenomena like interdependence and the contagion effect, a variety of methods and approaches can arise and complement one another. As a result, it is impossible to identify a method or strategy that is generally accepted.

The mapping of scientific production identified in this study indicates a trend of investment and growth in the clean energy sector. It is motivated by the global energy transition process involving social, economic, and environmental interaction.

Among its main contributions, this article offers an overview of the evolution of the interdependence analysis or effect of contagion in the context of agricultural commodities, indicating directions and gaps. In addition, this study will allow for future thoughts associated with research questions, results, and considerations achieved with this methodological approach. These results still can be explored in dialogue with what has already been produced by humanity, bringing new scientific elements and other information that help understand these and, eventually, other phenomena.

However, subsequent research is expected to continue the issues raised here and use the information in this article. We also highlight that analyzing social networks, words, clusters, and other metrics can imply new investigations concerning our object of study.

**References**

Ajide, F. M., & Dada, J. T. (2022). The impact of ICT on shadow economy in west Africa. *International Social Science Journal*, *72*(245), 749–767. doi: 10.1111/issj.12337.

Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, *11*(4), 959–975. doi: 10.1016/j.joi.2017.08.007.

Arnade, C., Cooke, B., & Gale, F. (2017). Agricultural price transmission: China relationships with world commodity markets. *Journal of Commodity Markets*, *7*, 28–40. doi: 10.1016/j.jcomm.2017.07.001.

Balcerzak, A. P., Uddin, G. S., Igliński, B., & Pietrzak, M. B. (2023). Global energy transition: From the main determinants to economic challenges regions. *Equilibrium. Quarterly Journal of Economics and Economic Policy*, *18*(3), 597–608. doi: 10.24136/eq.2023.018.

Baquedano, F. G., & Liefert, W. M. (2014). Market integration and price transmission in consumer markets of developing countries. *Food Policy*, *44*, 103–114. doi: 10.1016/j.foodpol.2013.11.001.

Barbaglia, L., Croux, C., & Wilms, I. (2020). Volatility spillovers in commodity markets: A large t-vector autoregressive approach. *Energy Economics*, *85*, 1–11. doi: 10.1016/j.eneco.2019.104555.

Bashir, U., Zebende, G. F., Yu, Y., Hussain, M., Ali, A., & Abbas, G. (2019). Differential market reactions to pre and post Brexit referendum. *Physica A*, *515*, 151–158. doi: 10.1016/j.physa.2018.09.182.

Beckmann, J., & Czudaj, R. (2014). Volatility transmission in agricultural futures markets. *Economic Modelling*, *36*, 541–546. doi: 10.1016/j.econmod.2013.09.036.

Beckmann, M., & Persson, O. (1998). The thirteen most cited journals in economics. *Scientometrics*, *42*(2), 267–271. doi: 10.1007/BF02458360.

Bertero, E., & Mayer, C. (1990). Structure and performance: Global interdependence of stock markets around the crash of october 1987∗. *European Economic Review*, *34*(6), 1155–1180. doi: 10.1016/0014-2921(90)90073-8.

Beusch, P., Frisk, J. E., Rosén, M., & Dilla, W. (2022). Management control for sustainability: Towards integrated systems. *Management Accounting Research*, *54*, 100777. doi: 10.1016/j.mar.2021.100777.

Bonato, M. (2019). Realized correlations, betas and volatility spillover in the agricultural commodity market: What has changed? *Journal of International Financial Markets, Institutions and Money*, *62*, 184–202. doi: 10.1016/j.intfin.2019.07.005.

Bornmann, L., & Wohlrabe, K. (2019). Normalisation of citation impact in economics. *Scientometrics*, *120*(2), 841–884. doi: 10.1007/s11192-019-03140-w.

Bouri, E., Lucey, B., Saeed, T., & Vo, X. V. (2021). The realized volatility of commodity futures: Interconnectedness and determinants. *International Review of Economics & Finance*, *73*, 139–151. doi: 10.1016/j.iref.2021.01.006.

Bürgi, C., & Wohlrabe, K. (2022). The influence of covid-19 on publications in economics: Bibliometric evidence from five working paper series. *Scientometrics*, *127*(9), 5175–5189. doi: 10.1007/s11192-022-04473-9.

Dahl, R. E., Oglend, A., & Yahya, M. (2020). Dynamics of volatility spillover in commodity markets: Linking crude oil to agriculture. *Journal of Commodity Markets*, *20*, 100111. doi: 10.1016/j.jcomm.2019.100111.

Despard, M., Chun, Y., Grinstein-Weiss, M., & Roll, S. (2020). COVID-19 job and income loss leading to more hunger and financial hardship. Brookings. Retrieved from https://www.brookings.edu/articles/covid-19-job-and-income-loss-leading-to-more-hunger-and-financial-hardship/.

Dias, R., Heliodoro, P., Alexandre, P., Santos, H., & Farinha, A. (2021). Long memory in stock returns: Evidence from the Eastern European markets. *SHS Web of Conferences, 91*, 01029. doi: 10.1051/shsconf/20219101029.

Diebold, F. X., & Yilmaz, K. (2009). Measuring financial asset return and volatility spillovers, with application to global equity markets. *Economic Journal*, *119*(534), 158–171. doi: 10.1111/j.1468-0297.2008.02208.x.

Diebold, F. X., & Yilmaz, K. (2009). Measuring financial asset return and volatility spillovers, with application to global equity markets. *Economic Journal*, *119*(534), 158–171. doi: 10.1111/j.1468-0297.2008.02208.x.

Du, X., Yu, C. L., & Hayes, D. J. (2011). Speculation and volatility spillover in the crude oil and agricultural commodity markets: A Bayesian analysis. *Energy Economics*, *33*(3), 497–503. doi: 10.1016/j.eneco.2010.12.015.

Elsevier (2022). SCOPUS: Expertly curated abstract & citation database. Expertly Curated Abstract & Citation Database. Retrieved from https://www.elsevier.com/solutions/scopus.

Fiszeder, P., & Małecka, M. (2022). Forecasting volatility during the outbreak of Russian invasion of Ukraine: Application to commodities, stock indices, currencies, and cryptocurrencies. *Equilibrium. Quarterly Journal of Economics and Economic Policy*, *17*(4), 939–967. doi: 10.24136/eq.2022.032.

Forbes, K., & Rigobon, R. (2001). Measuring contagion: Conceptual and empirical issues. In *International financial contagion* (pp. 43–66). Boston: Springer US. doi: 10.1007/978-1-4757-3314-3_3.

Galindo-Rueda, F., & López-Bassols, V. (2022). Implementing the OECD frascati manual: Proposed reference items for business R&D surveys. *OECD Science, Technology and Industry Working Papers*. doi: 10.1787/d686818d-en.

Gasparatos, A., Mudombi, S., Balde, B. S., Von Maltitz, G. P., Johnson, F. X., Romeu-Dalmau, C., Jumbe, C., Ochieng, C., Luhanga, D., Nyambane, A., Rossignoli, C.,Jarzebski, M., Dam Lam, R., Dompreh, E., & Willis, K. J. (2022). Local food security impacts of biofuel crop production in southern Africa. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *154*, 111875. doi: 10.1016/j.rser.2021.111875.

Grass, I., Loos, J., Baensch, S., Batáry, P., Librán-Embid, F., Ficiciyan, A., Klaus, F., Riechers, M., Rosa, J., Tiede, J., Udy, K., Westphal, C., Wurz, A., & Tscharntke, T. (2019). People and nature. *Land-Sharing/-Sparing Connectivity Landscapes for Ecosystem Services and Biodiversity Conservation*, *1*(2), 262–272. doi: 10.1002/pan3.21.

Guedes, E. F., Ferreira, P., Dionísio, A., & Zebende, G. F. (2019). An econophysics approach to study the effect of BREXIT referendum on European Union stock markets. *Physica A*, *523*, 1175–1182. doi: 10.1016/j.physa.2019.04.132.

Haldar, A., Sucharita, S., Dash, D. P., Sethi, N., & Chandra Padhan, P. (2023). The effects of ICT, electricity consumption, innovation and renewable power generation on economic growth: An income level analysis for the emerging economies. *Journal of Cleaner Production*, *384*, 135607. doi: 10.1016/j.jclepro.2022.135607.

Hamulczuk, M., & Pawlak, K. (2022). Determinants for international competitiveness of the food industry in 43 countries world-wide: evidence from panel models. *Equilibrium. Quarterly Journal of Economics and Economic Policy*, *17*(3), 635–667. doi: 10.24136/eq.2022.022.

Hansen, P. R., Lunde, A., & Voev, V. (2014). Realized beata GARCH: A multivariate GARCH model with realized measures of volatility. *Journal of Applied Econometrics*, *29*(5), 774–799. doi: 10.1002/jae.2389.

Hernandez, J. A., Shahzad, S. J. H., Uddin, G. S., & Kang, S. H. (2019). Can agricultural and precious metal commodities diversify and hedge extreme downside and upside oil market risk? An extreme quantile approach. *Resources Policy*, *62*, 588–601. doi: 10.1016/j.resourpol.2018.11.007.

Hernandez, M. A., Ibarra, R., & Trupkin, D. R. (2014). How far do shocks move across borders? Examining volatility transmission in major agricultural futures markets. *European Review of Agricultural Economics*, *41*(2), 301–325. doi: 10.1093/erae/jbt020.

Herwartz, H., & Saucedo, A. (2020). Food–oil volatility spillovers and the impact of distinct biofuel policies on price uncertainties on feedstock markets. *Agricultural Economics*, *51*(3), 387–402. doi: 10.1111/agec.12561.

Huang, J., Rozelle, S., & Chang, M. (2004). Tracking distortions in agriculture: China and its accession to the World Trade Organization. *World Bank Economic Review*, *18*(1), 59–84. doi: 10.1093/wber/lhh033.

Ji, Q., Bouri, E., Roubaud, D., & Kristoufek, L. (2019). Information interdependence among energy, cryptocurrency and major commodity markets. *Energy Economics*, *81*, 1042–1055. doi: 10.1016/j.eneco.2019.06.005.

Ji, Q., Bouri, E., Roubaud, D., & Shahzad, S. J. H. (2018). Risk spillover between energy and agricultural commodity markets: A dependence-switching CoVaR-copula model. *Energy Economics*, *75*, 14–27. doi: 10.1016/j.eneco.2018.08.015.

Kang, S. H., McIver, R., & Yoon, S.-M. (2017). Dynamic spillover effects among crude oil, precious metal, and agricultural commodity futures markets. *Energy Economics*, *62*, 19–32. doi: 10.1016/j.eneco.2016.12.011.

Kramarova, K., Švábová, L., & Gabrikova, B. (2022). Impacts of the covid-19 crisis on unemployment in Slovakia: A statistically created counterfactual approach using the time series analysis. *Equilibrium. Quarterly Journal of Economics and Economic Policy*, *17*(2), 343–389. doi: 10.24136/eq.2022.012.

Lajeunesse, M. J. (2016). Facilitating systematic reviews, data extraction and meta-analysis with the metagear package for R. *Methods in Ecology and Evolution*, *7*(3), 323–330. doi: 10.1111/2041-210X.12472.

Linnenluecke, M. K., Marrone, M., & Singh, A. K. (2020). Conducting systematic literature reviews and bibliometric analyses. *Australian Journal of Management*, *45*(2), 175–194. doi: 10.1177/0312896219877678.

Liu, N., Xu, Z., & Skare, M. (2021). The research on COVID-19 and economy from 2019 to 2020: Analysis from the perspective of bibliometrics. *Oeconomia Copernicana*, *12*(2), 217–268. doi: 10.24136/oc.2021.009.

Luo, J., & Ji, Q. (2018). High-frequency volatility connectedness between the US crude oil market and China's agricultural commodity markets. *Energy Economics*, *76*, 424–438. doi: 10.1016/j.eneco.2018.10.031.

Mantegna, R., & Stanley, E. (1999). *Introduction to econophysics: Correlations and complexity in finance*. Cambridge: Cambridge University Press.

Mensi, W., Hammoudeh, S., Nguyen, D. K., & Yoon, S.-M. (2014). Dynamic spillovers among major energy and cereal commodity prices. *Energy Economics*, *43*, 225–243. doi: 10.1016/j.eneco.2014.03.004.

Mlambo-Thata, B. (2010). Evaluating electronic resource programmes and provision: Case studies from Africa and Asia. *Learned Publishing*, *23*(3), 266–267. doi: 10.1087/20100311.

Nazlioglu, S., Erdem, C., & Soytas, U. (2013). Volatility spillover between oil and agricultural commodity markets. *Energy Economics*, *36*, 658–665. doi: 10.1016/j.eneco.2012.11.009.

Ortiz-Martínez, E., Marín-Hernández, S., & Santos-Jaén, J.-M. (2023). Sustainability, corporate social responsibility, non-financial reporting and company performance: Relationships and mediating effects in Spanish small and medium sized enterprises. *Sustainable Production and Consumption*, *35*, 349–364. doi: 10.1016/j.spc.2022.11.015.

Parra Paitan, C., & Verburg, P. (2019). Methods to assess the impacts and indirect land use change caused by telecoupled agricultural supply chains: A review. *Sustainability*, *11*(4), 1162–1162. doi: 10.3390/su11041162.

Pietrzak, M. B., Fałdziński, M., Balcerzak, A. P., Meluzín, T., & Zinecker, M. (2017). Short-term shocks and long-term relationships of interdependencies among central european capital markets. *Economics & Sociology*, *10*(1), 61–77. doi: 10.14254/2071-789X.2017/10-1/5.

Pimentel, D., Marklein, A., Toth, M. A., Karpoff, M. N., Paul, G. S., McCormack, R., Kyriazis, J., & Krueger, T. (2009). Food Versus biofuels: Environmental and economic costs. *Human Ecology*, *37*(1), 1–12. doi: 10.1007/s10745-009-9215-8.

Prisma-Scr (2022). Transparent reporting of systematic reviews and meta-analyses. Retrieved from https://www.prisma-statement.org/.

Quintino, D. D., Cantarinha, A., & Ferreira, P. J. S. (2021). Relationship between US and Brazilian ethanol prices: New evidence based on fractal regressions. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, *15*(5), 1215–1220. doi: 10.1002/bbb.2192.

Reboredo, J. C., Rivera-Castro, M. A., & Zebende, G. F. (2014). Oil and US dollar exchange rate dependence: A detrended cross-correlation approach. *Energy Economics*, *42*, 132–139. doi: 10.1016/j.eneco.2013.12.008.

Reboredo, J. C. (2012). Do food and oil prices co-move? *Energy Policy*, *49*, 456–467. doi: 10.1016/j.enpol.2012.06.035.

Rosales-Calderon, O., & Arantes, V. (2019). A review on commercial-scale high-value products that can be produced alongside cellulosic ethanol. *Biotechnology for Biofuels*, *12*(1), 240–240. doi: 10.1186/s13068-019-1529-1.

Rusydiana, A. S., Sukmana, R., Laila, N., & Bahri, M. S. (2022). The nexus between a green economy and islamic finance: Insights from a bibliometric analysis. *ICR Journal*, *13*, 51–71. doi: 10.52282/icr.v13i1.908.

Saghaian, S., Nemati, M., Walters, C. (2018). Asymmetric Price Volatility Transmission between U.S. Biofuel, Corn, and Oil Markets. *Journal of Agricultural and Resource Economics*, *43*(1), 46–60. doi: 10.22004/AG.ECON.267609.

Sampaio, C., Farinha, L., Sebastião, J. R., & Régio, M. (2022). How the 2008–2009 financial crisis shaped fair value accounting literature: A bibliometric approach. *Administrative Sciences*, *12*(1), 15–15. doi: 10.3390/admsci12010015.

Santana, M. M. M., Mariano-Neto, E., de Vasconcelos, R. N., Dodonov, P., & Medeiros, J. M. M. (2021). Mapping the research history, collaborations and trends of remote sensing in fire ecology. *Scientometrics*, *126*(2), 1359–1388. doi: 10.1007/s11192-020-03805-x.

Santana, T. P., Horta, N., Revez, C., Dias, R. M. T. S., & Zebende, G. F. (2023). Effects of interdependence and contagion on crude oil and precious metals according to ϱDCCA: A COVID-19 case study. *Sustainability*, *15*(5), 3945–3945. doi: 10.3390/su 15053945.

Shahzad, S. J. H., Hernandez, J. A., Al-Yahyaee, K. H., & Jammazi, R. (2018). Asymmetric risk spillovers between oil and agricultural commodities. *Energy Policy*, *118*, 182–198. doi: 10.1016/j.enpol.2018.03.074.

Silva, M. F. D., Pereira, É. J. D. A. L., Filho, A. M. D. S., Castro, A. P. N. D., Miranda, J. G. V., & Zebende, G. F. (2015). Quantifying cross-correlation between ibovespa and brazilian blue-chips: The DCCA approach. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, *424*, 124–129. doi: 10.1016/j.physa.2015.01.002.

Silva, M. F. D., Pereira, É. J. D. A. L., Filho, A. M. D. S., Castro, A. P. N. D., Miranda, J. G. V., & Zebende, G. F. (2016). Quantifying the contagion effect of the 2008 financial crisis between the G7 countries (by GDP nominal). *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, *453*, 1–8. doi: 10.1016/j.physa.2016.01.099.

Su, C. W., Wang, X.-Q., Tao, R., & Oana-Ramona, L. (2019). Do oil prices drive agricultural commodity prices? Further evidence in a global bio-energy context. *Energy*, *172*, 691–701. doi: 10.1016/j.energy.2019.02.028.

Svabova, L., Tesarova, E. N., Durica, M., & Strakova, L. (2021). Evaluation of the impacts of the COVID-19 pandemic on the development of the unemployment rate in Slovakia: Counterfactual before-after comparison. *Equilibrium. Quarterly Journal of Economics and Economic Policy*, *16*(2), 261–284. doi: 10.24136/eq.2021. 010.

Tahir, Z., & Riaz, K. (1997). Integration of agricultural commodity markets in Punjab. *Pakistan Development Review*, *36*(3), 241–262. doi: 10.30541/v36i3pp.241-262.

Tiwari, A. K., Abakah, E. J. A., Adewuyi, A. O., & Lee, C.-C. (2022). Quantile risk spillovers between energy and agricultural commodity markets: Evidence from pre and during COVID-19 outbreak. *Energy Economics*, *113*, 106235. doi: 10.1016/ j.eneco.2022.106235.

Tokarchuk, D., Pryshliak, N., Shynkovych, A., & Berezyuk, S. (2022). Food security and biofuel production: Solving the dilemma on the example of Ukraine. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal*, *25*(2), 179–196. doi: 10.33223/epj/150 496.

Umar, Z., Gubareva, M., Naeem, M., & Akhter, A. (2021). Return and volatility transmission between oil price shocks and agricultural commodities. *PLOS ONE*, *16*(2), e0246886. doi: 10.1371/journal.pone.0246886.

United Nations (2023). What is Sustainable Development? Retrieved from https://www.un.org/sustainabledevelopment/blog/2023/08/what-is-sustainable-development/.

Vasconcelos, R. N., Lima, A. T. C., Lentini, C. A. D., Miranda, G. V., Mendonça, L. F., Silva, M. A., Cambuí, E., Lopes, J., Porsani, M. J. (2020). Oil spill detection and mapping: A 50-year bibliometric analysis. *Remote Sensing*, *12*(21), 1–18. doi: 10.3390/rs12213647.

Yip, P. S., Brooks, R., Do, H. X., & Nguyen, D. K. (2020). Dynamic volatility spillover effects between oil and agricultural products. *International Review of Financial Analysis*, *69*, 101465. doi: 10.1016/j.irfa.2020.101465.

Zafeiriou, E., Arabatzis, G., Karanikola, P., Tampakis, S., & Tsiantikoudis, S. (2018). Agricultural commodity and crude oil prices: An empirical investigation of their relationship. *Sustainability*, *10*(4), 1199. doi: 10.3390/su10041199.

**Acknowledgments**

We are grateful for comments and suggestions from anonymous reviewers that helped improve the quality and presentation of the manuscript. Rui Dias is pleased to acknowledge the financial support from Instituto Politécnico de Setúbal.

Ministry of Education and Science
Republic of Poland

The journal is co-financed in the years 2022–2024 by the Ministry of Education and Science of the Republic of Poland in the framework of the ministerial programme "Development of Scientific Journals" (RCN) on the basis of contract no. RCN/SN/0129/2021/1concluded on 29 September 2022 and being in force until 28 September 2024.

## Annex

**Table 1.** This table describes the link between research questions, analysis (statistical procedure) and data. In the first column, we have the questions, in the second column we have the type of results/analysis and in the third column the data that were used

| Question | Analysis | Data |
|---|---|---|
| What is the trend in the number of publications on interdependence or contagion effects in the agricultural commodities market? | Descriptive Statistics / Frequency Distribution (Publications x Year of publication) | All articles |
| Which countries have published the most studies on interdependence or the contagion effect in the agricultural commodities market? | Descriptive Statistics/ Mapping (Country linked to publication x Number of publications) | All articles |
| What are the most cited publications on interdependence or contagion effects in the agricultural commodities market? | Descriptive Statistics / Frequency Distribution (Authors x Number of publications) | All articles / 10 more published |
| Which authors have published the most about interdependence or contagion effects in the agricultural commodities market? | Descriptive Statistics / Frequency Distribution (Authors x Number of publications) | All articles / 10 more cited |
| Which journals have published the most studies on interdependence or the contagion effect in the agricultural commodities market? | Descriptive Statistics / Frequency Distribution (Magazines x Number of publications) | All articles / 10 more published |
| Which commodities are addressed in studies of interdependence or contagion effects on the agricultural market? | Descriptive Statistics / Frequency Distribution (Documents x Commodities) | 20% of the most cited articles by decade |
| What methods are applied in the studies to identify interdependence or contagion effects on the agricultural commodities market? | Descriptive Statistics / Frequency Distribution (Documents x Methods) | All articles / 20% of the most cited articles by decade |
| What are the scientific perspectives on the analysis of interdependence and contagion effects in agricultural commodities concerning the sustainability discourse? | Inferential analysis from the perspective of sustainability. | Set of the results. |

**Table 2.** General description of the database. The description is divided into Main information about data, Document contents, Authors, Authors collaboration and Document types

| Description | Results |
|---|---|
| **Main about data** | - |
| Timespan | 1997:2022 |
| Sources (Journals, Books, etc) | 79 |
| Documents | 127 |
| Annual Growth Rate % | 13.16 |
| Document Average Age | 4.87 |
| Average citations per doc | 26.54 |
| References | 5512 |
| **Document contents** | - |
| Keywords Plus (ID) | 420 |
| Author's Keywords (DE) | 384 |
| **Authors** | - |
| Authors | 324 |
| Authors of single-authored docs | 5 |
| **Authors collaboration** | - |
| Single-authored docs | 5 |
| Co-Authors per Doc | 2.92 |
| International co-authorships % | 37.8 |
| **Document Types** | - |
| Article | 127 |

Source: Own elaboration using package Bibliometrix /R-project.

**Table 3.** Describes the number of articles accepted in the sample. The first column presents the subdivision by decade, the second column the number of articles for each period, and the third column the admitted sample

| | Number of articles per decade | Sample admitted |
|---|---|---|
| First decade | 2 | 2 |
| Second decade | 31 | 7 |
| Third decade | 94 | 19 |

**Table 4.** Agricultural commodities identified in the studies. The first column presents the subdivisions by decade, the second is the study's identification, the third is the number of citations, and the fourth presents the commodities analyzed in that document

| | Study | Number of citations | Commodities |
|---|---|---|---|
| First decade | Tahir and Riaz, 1997, Pak Dev Rev | 3 | Wheat, Cotton, Rice |
| | Huang *et al.*, 2004, World Bank Econ Rev | 55 | Corn, Soybean, Rice, Wheat |
| Second decade | Hernandez *et al.*, 2014, Eur Rev Agric Econ | 57 | Corn, Wheat, Soybean |
| | Beckmann and Czudaj, 2014, Econ Model | 57 | Cotton, Wheat, Corn |
| | Baquedano and Liefert, 2014, Food Policy | 62 | Wheat, Rice, Corn, Sorghum |
| | Mensi *et al.*, 2014, Energy Econ | 124 | Barley, Corn, Sorghum, Wheat |
| | Reboredo, 2012, Energy Policy | 140 | Corn, Soybean, Wheat |
| | Nazlioglu *et al.*, 2013, Energy Econ | 255 | Wheat, Corn, Soybean, Sugar |
| | Du *et al.*, 2011, Energy Econ | 259 | Corn, Wheat |
| Third decade | Tiwari *et al.*, 2022, Energy Econ | 24 | Corn, Wheat, Soybean, Coffee, Cotton, Sugar |
| | Umar *et al.*, 2021, Plos One | 27 | Soybean, Wheat, Cocoa, Coffee, Cotton, Feeder cattle, Lean hogs, Live cattle, Livestock Sugar |
| | Arnade *et al.*, 2017, J Commod Markets | 28 | Beef, Corn, Cotton, Pork, Wheat, Soybean, Soybean Meal, Chicken, Rice |
| | Hernandez *et al.*, 2019, Resour Policy | 28 | Wheat, Corn, Rice |
| | Saghaian *et al.*, 2018, J Agric Resour Econ | 30 | Corn |
| | Bonato, 2019, J Int Financ Mark Inst Money | 31 | Corn, Soybeans, Wheat, Soybean oil, Coffee, Cotton, Sugar, Cocoa |
| | Zafeiriou *et al*, 2018, Sustainability | 33 | Soybean, corn |
| | Barbaglia *et al.*, 2020, Energy Econ | 37 | Corn, Wheat, Soybean, Sugar, Cotton, Coffee |
| | Bouri *et al.*, 2021, Int Rev Econ Financ | 41 | Cocoa, Coffee, Corn, Cotton, Orange juice, Soybean, Soybean meal, Sugar, Wheat |
| | Yip *et al.*,, 2020, Int Rev Financ Anal | 46 | Corn, Wheat, soybean |
| | Dahl *et al.*, 2020, J Commod Markets | 55 | Corn, Wheat, Soybean, Soybean meal, Soybean oil, Canola, Cocoa, Sugar, Cotton, Coffee |
| | Shahzad et al., 2018, Energy Policy | 69 | Wheat, Corn, Soybean, Rice |
| | Ji *et al.*, 2019, Energy Econ | 111 | Live cattle, Cocoa, Coffee, Corn, Cotton, Lean hogs, Orange juice, Soybean, Wheat, Sugar |
| | Luo and Ji, 2018, Energy Econ | 115 | Soybean, Corn, Cotton, Wheat, Palm |
| | Ji *et al.*, 2018, Energy Econ | 150 | Corn, Rice, Soybean, Wheat |
| | Kang *et al.*, 2017, Energy Econ | 275 | Corn, Wheat, Rice |

**Table 5.** Number of times the commodity was studied in each decade and the total period. In the first column, the commodity is presented; in the second, third, and fourth columns, the number of articles per decade that studied the commodity; and in the last column, the number of studies in which the commodity was studied throughout the period

| | Number of articles | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Commodities** | **1st decade 1997:2006** | **2nd decade 2007:2016** | **3rd decade 2017:2022** | **All period** |
| Barley | - | 1 | - | 1 |
| Beef | - | - | 1 | 1 |
| Canola | - | - | 2 | 2 |
| Chicken | - | - | 1 | 1 |
| Cocoa | - | - | 7 | 7 |
| Coffee | - | - | 8 | 8 |
| Corn | 1 | 7 | 18 | 26 |
| Cotton | 1 | 1 | 10 | 12 |
| Feeder cattle | - | - | 2 | 2 |
| Lumber | - | - | 1 | 1 |
| Lean hogs | - | - | 3 | 3 |
| Live cattle | - | - | 3 | 3 |
| Livestock | - | - | 1 | 1 |
| Oats | - | - | 2 | 2 |
| Orange juice | - | - | 3 | 3 |
| Palm | - | - | 1 | 1 |
| Pork | - | - | 1 | 1 |
| Rice | 2 | 1 | 6 | 9 |
| Rubber | - | - | 1 | 1 |
| Sorghum | - | 2 | - | 2 |
| Soybean | 1 | 3 | 15 | 19 |
| Soybean meal | - | - | 3 | 3 |
| Soybean oil | - | - | 2 | 2 |
| Sugar | - | 1 | 9 | 10 |
| Wheat | 2 | 7 | 16 | 25 |
| Tea | - | - | 1 | 1 |

**Table 6.** Methods identified in the studies. The first column presents the subdivisions by decade, the second the identification of the study, the third the number of citations, and the fourth the method presented by the authors of the document

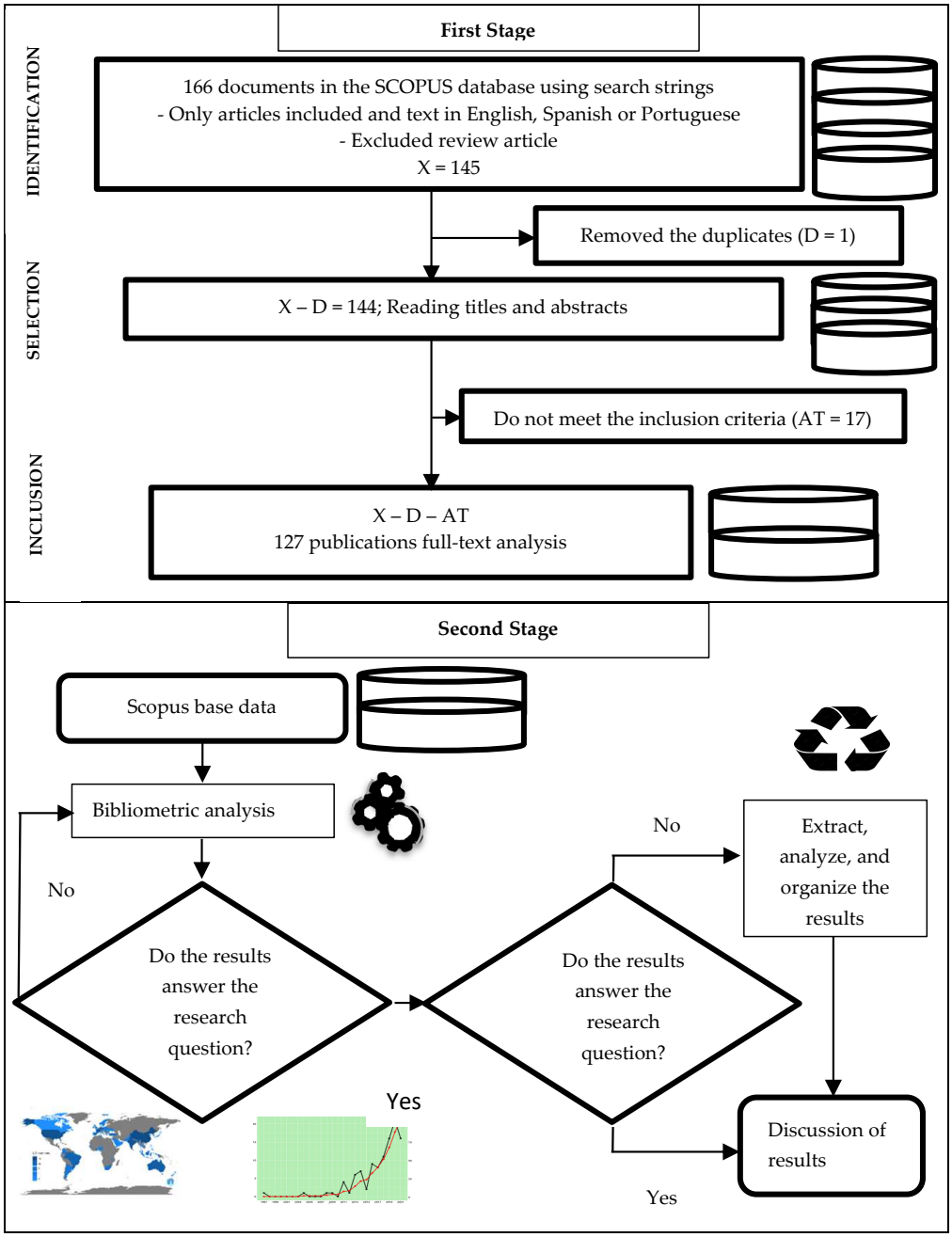
| | **Study** | **Number of citations** | **Methods*** |
|---|---|---|---|
| **First decade** | Tahir and Riaz, 1997, Pak Dev Rev | 3 | Ravallion model |
| | Huang *et al.*, 2004, World Bank Econ Rev | 55 | Cointegration Engle-Granger |

**Table 6.** Continued

| | Study | Number of citations | Methods* |
|---|---|---|---|
| Second decade | Hernandez *et al*., 2014, Eur Rev Agric Econ | 57 | VAR-BEKK-DCC-MGARCH |
| | Beckmann and Czudaj, 2014, Econ Model | 57 | VAR-GARCH |
| | Baquedano and Liefert, 2014, Food Policy | 62 | SEECM |
| | Mensi *et al*., 2014, Energy Econ | 124 | VAR-BEKK-DCC-MGARCH |
| | Reboredo, 2012, Energy Policy | 140 | Copula models |
| | Nazlioglu *et al*., 2013, Energy Econ | 255 | CIV - IRF |
| | Du *et al*., 2011, Energy Econ | 259 | SVMJ |
| Third decade | Tiwari *et al*., 2022, Energy Econ | 24 | Quantile VAR |
| | Umar *et al*., 2021, Plos One | 27 | Granger causality tests and index of Diebold and Yilmaz |
| | Arnade *et al*., 2017, J Commod Markets | 28 | VAR-ECM |
| | Hernandez *et al*., 2019, Resour Policy | 28 | CQ Approach |
| | Saghaian et al., 2018, J Agric Resour Econ | 30 | BEKK-MGARCH |
| | Bonato, 2019, J Int Financ Mark Inst Money | 31 | Beta-GARCH |
| | Zafeiriou *et al*, 2018, Sustainability | 33 | ARDL |
| | Barbaglia *et al*., 2020, Energy Econ | 37 | VAR |
| | Bouri *et al*., 2021, Int Rev Econ Financ | 41 | TVP-VAR |
| | Yip *et al*.,, 2020, Int Rev Financ Anal | 46 | FIVAR |
| | Dahl *et al*., 2020, J Commod Markets | 55 | EGARCH |
| | Shahzad *et al*., 2018, Energy Policy | 69 | GARCH-Copulas |
| | Ji *et al*., 2019, Energy Econ | 111 | Entropy Transfer |
| | Luo and Ji, 2018, Energy Econ | 115 | HAR and DCC-GARCH |
| | Ji *et al*., 2018, Energy Econ | 150 | CoVaR-copulas |
| | Kang *et al*., 2017, Energy Econ | 275 | DECO-GARCH |

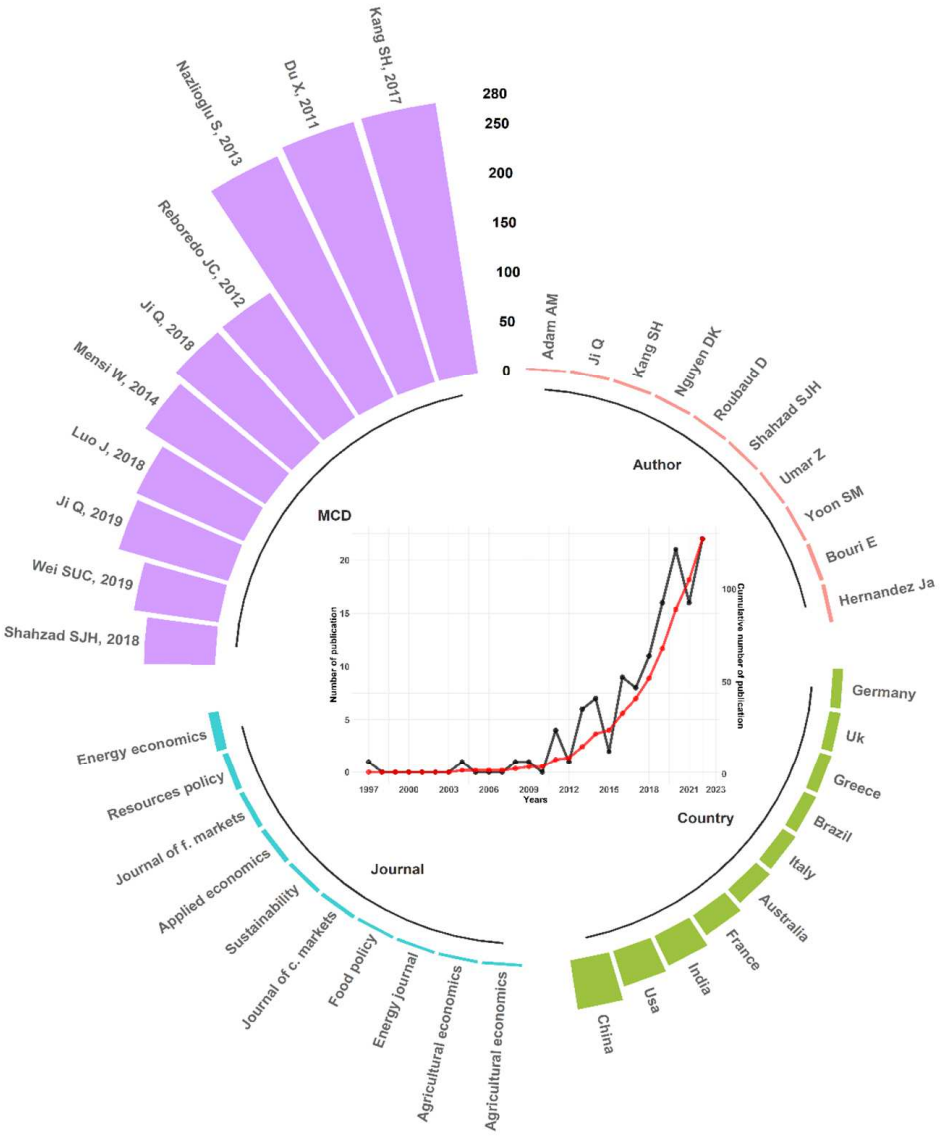
Note: * GARCH: Generalized autoregressive conditional heteroscedasticity; VAR: Vector autoregressive; MGARCH: Multivariate GARCH; EGARCH: Exponential GARCH; BEKK-MGARCH (Baba Engle Kraft Kroner MGARCH): stochastic volatility models with Jumps; BFGS: Broyden Fletcher Goldfar Shanno; ECM: Error correction model; CIV: Causality in variance; IRF: Impulse response functions; SEECM: Single equation error correction model; TVP: time-varying parameter; DCC: Dynamic conditional correlation; HAR: Autoregressive heterogeneous; ARDL: Autoregressive Distributed Lag; FIVAR: Fractionally integrated autoregressive template vector multivariate; DECO: Dynamic de Equicorrelation.

**Figure 1.** The scheme represents the database and activities employed in the study stages



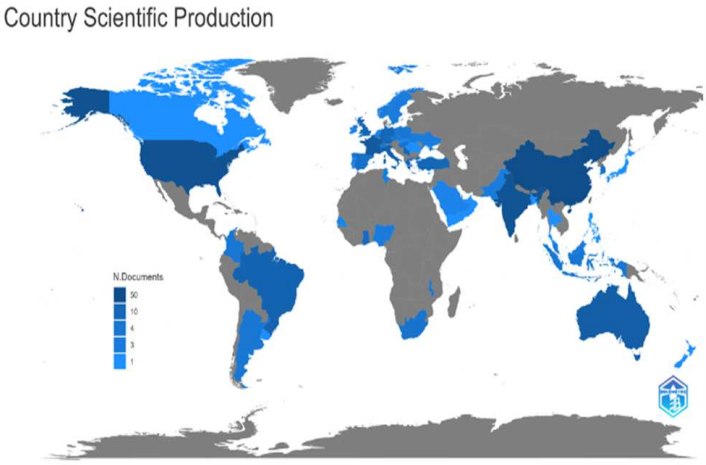

Source: Own elaboration using the Canvas app. Note: The first stage includes identification based on keywords, selection based on reading titles and abstracts, and the inclusion of texts for complete analysis. The second stage includes a data processing flowchart via Bibliometrix, analysis of whole texts, generation of results with an evaluation of answers, organization, structuring, and analysis.

**Figure 2.** General statistics associated with the top 10 for the most cited documents (MCD), production sources (Journal), most productive authors (Author) and countries and annual publication growth (black curve, left y-axis) compared to cumulative annual growth (red curve, right y-axis) rate of all manuscripts indexed in the Scopus database by year (1997–2022)




Source: Own elaboration using package ggplot2 /R-project.

**Figure 3.** Map of scientific production associated with countries. More intense tones indicate greater scientific production. Source: Elaboration of the authors




| Region | Freq | %Freq. |
|---|---|---|
| CHINA | 50 | 14.12% |
| USA | 37 | 10.45% |
| INDIA | 33 | 9.32% |
| FRANCE | 24 | 6.78% |
| AUSTRALIA | 18 | 5.08% |
| ITALY | 15 | 4.24% |
| BRAZIL | 13 | 3.67% |
| GREECE | 12 | 3.39% |
| UK | 11 | 3.11% |
| GERMANY | 10 | 2.82% |

Source: Own elaboration using package Bibliometrix /R-project.

## 3.3 Análise de autocorrelação em commodities agropecuárias



XXVI ENMC
ENCONTRO NACIONAL DE MODELAGEM COMPUTACIONAL
XIV ECTM
ENCONTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS
2023

# ANÁLISE DE AUTOCORRELAÇÃO EM COMMODITIES AGROPECUÁRIAS

**Thiago Pires Santana**[1,2] – tpsantana@uefs.br
**Aloísio Machado da Silva Filho**[1,2] – aloisioestatistico@uefs.br
**Gilney Figueira Zebende**[1] – gfzebende@uefs.br

[1] Universidade Estadual de Feira de Santana – Feira de Santana, BA, Brazil
[2] Programa de Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente, Universidade Estadual de Feira de Santana – Feira de Santana, BA, Brazil

***Resumo.*** *As commodities de boi gordo, milho e soja tem sido as protagonistas no setor agropecuário na Bahia, dado a quantidade de mercados produtores e o volume comercializado. Neste trabalho propomos estudar os níveis de autocorrelação nas principais regiões produtoras das commodities de milho, boi gordo e soja na Bahia. Para esse objetivo obtivemos o expoente* $\alpha_{DFA}$ *para avaliar a autocorrelação, além disso analisamos descritivamente os índices diários de preço de 2018 a 2022 em cada praça, a partir de medidas de tendência central, dispersão e forma da distribuição de frequência. Percebemos que, existe pouca discrepância nas medidas descritivas entre os índices de cada commodity e que os índices são autocorrelacionados e indicam que valores anteriores interferem em valores futuros.*

***Palavras-Chave:*** *Commodities agropecuárias, análise de autocorrelação,* $\alpha_{DFA}$

## 1. INTRODUÇÃO

Analisar o comportamento econômico, em especial a dinâmica de preços em produtos alimentícios, tem sido uma preocupação constante de governantes, investidores e pesquisadores haja vista os impactos e as consequências que a flutuação descontralada e imprevísivel dos preços têm no controle da inflação, segurança alimentar, gerenciamento, sustentabilidade e outros (Abbott P., 2011).

Estudos recente têm se preocupado em estudar a volatilidade dos preços de itens agropecuários, principalmente milho, trigo, soja que são itens básicos da alimentação (Santana et al. 2023). Estes estudos contribuem para as discussões socioeconômicas identificando a existência de memória a partir da análise de autocorrelação e persistência (David et al., 2020; Guedes et al., 2019; Prass & Pumi, 2021; Quintino et al., 2020; Zebende et al., 2022).

A análise de autocorrelação permite a identificação de ausência ou existência de memória persistente ou antipersistente, i.e. uma série com persistente indica que valores grandes tendem a ser sguidos por valores grande, uma série antipersistentes valores pequenos tendem a ser seguidos por valores grandes e vice-versa e uma série sem memória não é autocorrelacionada ou seja valores anteriores não influenciam valores futuros logo não podem ser identificados

possíveis tendências (Candila V., 2018; Carvalho J.C. Hasegawa M.M., 2020; Fasanya I.O., 2020; Guedes, 2019; Yaya et al., 2021).

Embora a Bahia seja o quinto maior estado em extensão territorial do país com 564,7 mil km², quarta maior população do país com aproximadamente 16 milhões de pessoas (COEST/SEI, 2023), não se identifica estudos que analisem autocorrelação e volatilidade em índices de preço e retorno nas suas regiões produtoras de commodities agropecuárias.

Na Fig. 1 podemos identificar a evolução em termos absolutos e percentuais da área cobertura destinada ao setor agropecuário no período de 198 a 2022.

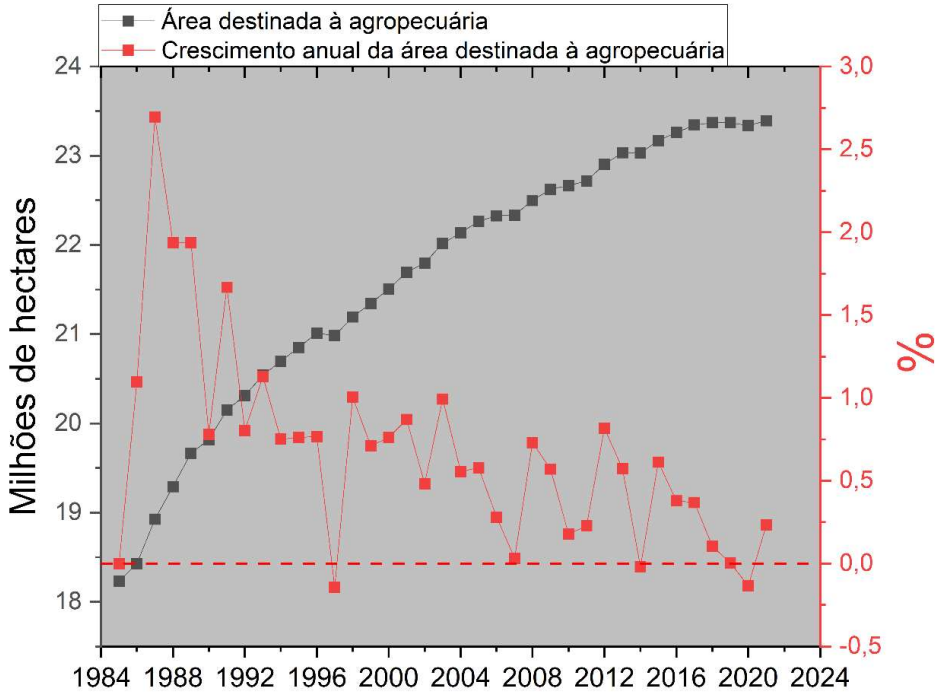



Figura 1 - Crescimento da área destinada a produção agropecuária na Bahia no período de 1984 a 2022. Fonte: Mapbiomas (2023).

A Fig. 1 mostra a esquerda a evolução da área destinada a agropecuária na Bahia, enquanto escala a direita mostra o crescimento percentual ao ano. Nela identifica-se o crescimento na área destinada ao setor, o que fica evidente na taxa de crescimento percentual em a maioria dos valores são positivos, exceto em meados de 1997 e 2020 no qual houve uma retração significativa da área devido a crise climática e a pandêmica causada pela COVID-19, respectivamente.

Este artigo foi desenvolvido com o objetivo de estudar os níveis de autocorrelação nas regiões (praças) produtoras das commodities de milho, boi gordo e soja. Para isso, além do estudo descritivo, analisamos as autocorrelações dos índices de preço e retornos a partir do expoente $\alpha_{DFA}$ (DFA: Detrended Fluctuation Analysis).

## 2. METODOLOGIA

Nesta seção iremos descrever os materiais (dados e fontes) utilizados para responder alcançar o objetivo de investigação. Seguidamente, mostraremos o método utilizado para analisar as autocorrelações dos índices de preço.

## 2.1 Materiais

Foram utilizados índices de preço disponibilizados pela Secretaria de Agricultura, Pecuária, Irrigação, Pesca e Aquicultura (Seagri) do estado da Bahia, disponíveis no *link* http://www.seagri.ba.gov.br/cotacao. Da mesma forma a variável preço foi utilizada para analisar a existência de memória (autocorrelação) e o nível de persistência.

As commodities de milho, boi gordo e soja foram selecionadas entre outras por causa do seu destaque no cenário estadual, destacando-se a Bahia com: 5 praças produtoras de milho (Adustina, Barreiras, Irecê, Ribeira do Pombal e Tucano), 6 de boi gordo (Barreiras, Feira de Santana, Itapetinga, Jequié, Salvador, Santo Antônio de Jesus) e 1 de soja (Barreiras).

## 2.2 Métodos

O método utilizado para análise de autocorrelação foi desenvolvido por Peng et al. (1994). Abaixo é descrito o algoritmo computacional para determinação do expoente $\alpha_{DFA}$.

Considere uma série temporal $\{x_i\}$ de tamanho $N$, com $i = 1, 2, 3, \cdots, N$. Para calcular o $\alpha_{DFA}$ pode-se admitir os seguintes passos:

1. Integrar $\{x_i\}$. Para encontrar a série integrada $\{X_k\}$ deve-se usar

$$X_k = \sum_1^k [x_i - \langle x \rangle] \tag{1}$$

sendo $\langle x \rangle$ o valor médio de $\{x_i\}$ e $i \leq k \leq N$;

2. A série $\{X_k\}$ é dividida em $(N - n)$ caixas sobrepostas de comprimento igual a $n$ (escala temporal) contendo $n + 1$ elementos;
3. Em cada caixa, com $i \leq k \leq i + n$, calcula-se a tendência linear local $\tilde{X}_{k,i}$ para $X_k$ para se obter a função de covariância

$$f_{DFA_x}^2(n, i) \equiv \frac{1}{n+1} \sum_{k=i}^{i+n} \left(X_k - \tilde{X}_{k,i}\right)^2 \tag{2}$$

4. Seguidamente para cada escala temporal de comprimento $n$, calcula-se a função de correlação sem tendência:

$$F_{DFA_x}^2(n) \equiv \frac{1}{N-n} \sum_{i=1}^{N-n} f_{DFA_x}^2(n, i) \tag{3}$$

5. A partir da função $F_{DFA_x}(n)$ e verificando a lei de potência ($F_{DFA}(n) \sim n^{\alpha_{DFA}}$), o expoente de autocorrelação de longo alcance é dado por:

$$\alpha_{DFA} \equiv {}^{log\, F_{DFA}(n)}/_{log\, n} \tag{4}$$

6. Para o cálculo do $\alpha_{DFA}$ as etapas acimas são repetidas para uma escala temporal $4 \leq n \leq {}^{N}/_{4}$.

. Na Tabela 1 temos os parâmetros resultantes da Eq. 4 e a característica das séries.

Tabela 1 - Parâmetros do expoente $\alpha_{DFA}$ para avaliação da autocorrelação de longo alcance em séries temporais.

| $\alpha_{DFA}$ | **Característica** |
|---|---|
| $\alpha_{DFA} < 0{,}5$ | Autocorrelação e antipersistente |
| $\alpha_{DFA} \simeq 0{,}5$ | Não correlacionada |
| $\alpha_{DFA} > 0{,}5$ | Autocorrelação e persistente |
| $\alpha_{DFA} \simeq 1{,}0$ | Ruído $1/f$ |
| $\alpha_{DFA} > 1{,}0$ | Não estacionária |
| $\alpha_{DFA} \simeq 1{,}5$ | Ruído browniano |

Fonte: Adaptado de Guedes (2019), Kristoufek & Vosvrda, (2013) e Peng et al. (1994).

A Tabela 1 apresenta os valores para caracterização do nível de autocorrelação, com $\alpha_{DFA} > 0$ e adimencional. Resumidamente temos que para $\alpha_{DFA} \simeq 0{,}5$ não existe memória na série, para $0 < \alpha_{DFA} < 0{,}5$ há memória antipersistentes e para $\alpha_{DFA} > 0{,}5$ há memória persistente. Apesar deste método ser relativamente recente ele têm sido aplicado em ínumeros estudos dessa natureza e apresentados resultados inovadores na análise de séries temporais econômicas.

## 7. RESULTAOS E DISCUSSÃO

Apresentamos nesta seção os resultados obtidos e discussões a partir dos índices de preços das commodities de boi gordo, milho e soja no estado da Bahia durante o período de 01/01/2017 a 31/12/2022. Neste período, temos um total de 2191 dias corridos, 1507 dias úteis (segunda a sexta) e 1366 dias efetivos (dias em que houve cotação em todas as praças) para milho, 1291 para boi gordo, 1446 para soja. Especificamente na praça de Barreiras, identificamos 1438 dias efetivos em que houve cotação das três commodities.

A Fig. 2 apresenta a cotação das commodities de boi gordo, milho e soja respectivamente. Nela é apresentado os índices de preço em todas as praças nula escala anual com cotação em reais da arroba do boi gordo e saca de 60 kg de milho e soja.

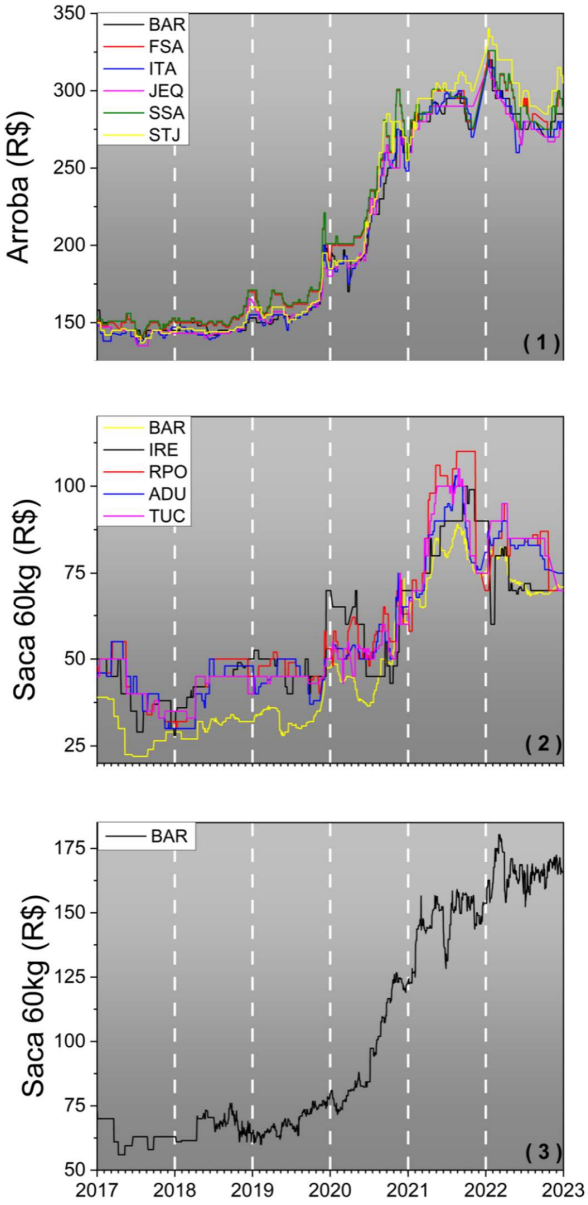



Figura 2 - Evolução dos preços das commodities de boi gordo ( 1 ), milho ( 2 ) e soja ( 3 ), 2017 – 2022. Fonte: SEAGRI-BA.

Nota-se no gráfico 1 da Fig. 2 que os preços da arrobado do boi gordo são homogêneos ao longo do tempo, isto significa que não há grandes dispersões entre os índices de uma praça para outra e que flutuam aproximadamente na mesma escala de tempo. No gráfico 2 os preços da saca de milho possuem maior variação entre as praças, sendo barreiras (linha amarela) a praça que possui menor preço durante o período analisado. No gráfico 3 a cotação da soja apresenta acentuada elevação nos últimos anos e acompanha a flutuação dos preços das outras commodities. Em todos os índices apresentados na figura percebemos que no início de 2020 (período em que começou a crise causada pela COVID-19) houve uma acentuada elevação nos índices, com destaque ao período entre os primeiros meses de 2020 e os últimos meses de 2021.

Outra característica que podemos notar é que a partir dos primeiros meses de 2022 o preço da arroga do boi e do milho admite uma tendência de queda, respectivamente, enquanto a soja tende a estabilizar o preço em torno de R$ 160,00 reais a saca.

A Tabela 2 apresenta a estatística descritiva dos índices de preço de cada commodity em sua respectiva praça. Para essa descrição todos as cotações foram pareadas por data e commodity para viabilizar a análise em termos comparativos.

Tabela 2 - Estatísticas descritivas das commodities de milho, soja e boi gordo por praça[1]

| | | n | Média | Desvio padrão | Min | Max | Intervalo | Assimetria | Curtose |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Milho** | BAR | 1366 | 48,07 | 20,84 | 22,00 | 89,00 | 67,00 | 0,52 | -1,30 |
| | IRE | 1366 | 56,85 | 17,94 | 28,00 | 100,00 | 72,00 | 0,65 | -0,66 |
| | RPO | 1366 | 60,61 | 22,10 | 30,00 | 110,00 | 80,00 | 0,80 | -0,48 |
| | ADU | 1366 | 57,89 | 19,66 | 30,00 | 103,00 | 73,00 | 0,55 | -0,96 |
| | TUC | 1366 | 58,59 | 20,68 | 33,00 | 105,00 | 72,00 | 0,76 | -0,86 |
| **Soja** | BAR | 1406 | 101,17 | 41,76 | 56,00 | 180,33 | 124,33 | 0,55 | -1,44 |
| **Boi gordo** | BAR | 1291 | 203,08 | 61,94 | 140,00 | 320,00 | 180,00 | 0,46 | -1,55 |
| | FSA | 1291 | 210,91 | 63,12 | 140,00 | 325,00 | 185,00 | 0,38 | -1,60 |
| | ITA | 1291 | 202,28 | 63,15 | 136,00 | 320,00 | 184,00 | 0,45 | -1,55 |
| | JEQ | 1291 | 202,01 | 61,54 | 135,00 | 315,00 | 180,00 | 0,43 | -1,58 |
| | SSA | 1291 | 211,94 | 63,07 | 141,00 | 326,00 | 185,00 | 0,39 | -1,58 |
| | STJ | 1291 | 209,80 | 69,96 | 137,00 | 340,00 | 203,00 | 0,47 | -1,54 |

Fonte: Elaboração própria.

No que se refere a commodity de milho identifica-se relativa proximidade nos valores médios da saca, exceto na praça de Barreiras. Tanto em valores médios, quanto em termos de mínimo, máximo e amplitude as cotações em Barreiras apresentam os menores valores. Em todas as praças a distribuição de frequência apresenta forma assimétrica positiva (média maior que mediana e mediana maior que moda) e curtose negativa (platicúrtica / elevado grau de achatamento).

Barreira é a única região produtora de soja que possui cotação diária de preço, apresentando significativa dispersão em relação a média e elevada amplitude entre valor máximo e mínimo. Sua distribuição de frequência é assimétrica positiva e curtose negativa.

A commodity de boi gordo é a que apresenta maior proximidade em termos de medida central e de dispersão. É percebido menor assimetria na distribuição de frequência e maior grau de achatamento entre as três.

Percebemos que descritivamente não há grandes anamalias nas características dos índices de preço. Acreditados que a alta amplitude nos índices se deve ao fato da crise causada pela pandemia da COVID-19. Ainda notamos que Barreiras possui características próprias na dinâmica de preço devido provavelmente a inlfuência de fatores internos como por exemplo: milho e soja são uma das principais fonte de ração bovina, é a praça geograficamente mais distante das outras regiões do estado e é a única produtora das três commodities.

[1] ADU: Adustina; BAR: Barreiras; FSA: Feira de Santana; IRE: Irecê; ITA: Itapetinga; JEQ: Jequié; RPO: Ribeira do Pombal; SSA: Salvador; STJ: Santo Antônio de Jesus; TUC: Tucano.

Estimamos o expoente $\alpha_{DFA}$ para os índices de preço e seus respectivos retornos para avaliação das autocorrelações, ver Tabela 3. Nela podemos identificar o expoente de autocorrelação a partir da praça (linha) e commodity (coluna).

Tabela 3 - Estimativas do expoente DFA para os índices de preço e retorno das commodities de boi gordo, milho e soja por praça. Os erros encontrados para $\alpha_{DFA}$ são abaixo de ± 0,01.

| | | **Commodities** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Boi gordo | Milho | Soja | Retorno Boi gordo | Retorno milho | Retorno soja |
| Praça | ADU | - | 1,46 | - | - | 0,48 | - |
| | BAR | 1,50 | 1,54 | 1,43 | 0,43 | 0,56 | 0,38 |
| | FSA | 1,40 | - | - | 0,46 | - | - |
| | IRE | - | 1,37 | - | - | 0,44 | - |
| | ITA | 1,46 | - | - | 0,45 | - | - |
| | JEQ | 1,52 | - | - | 0,48 | - | - |
| | RPO | - | 1,40 | - | - | 0,44 | - |
| | SSA | 1,41 | - | - | 0,48 | - | - |
| | STJ | 1,51 | - | - | 0,50 | - | - |
| | TUC | - | 1,44 | - | - | 0,41 | - |

Fonte: Elaboração própria.

A partir da caracterização das autocorrelações contidas na Tabela 2, podemos afirmar que as séries de índices de preço apresentam as seguintes características: são autocorrelacionadas existe memória persistente, i.e. cotações anteriores influenciam cotações futuras e valores grandes (pequenos) tendem a ser seguidos por valores grandes (pequenos). Além disso, todos os índices apresentam característica não estacionárias, isto significa que, durante o período analisado as medidas de tendência central e dispersão não flutuam em função de um valor fixo.

Para facilitar a análise em termos comparativos entre diferentes commodities, calculamos o expoente $\alpha_{DFA}$ para os log-retornos dos índices de preço ($\log_{10}\frac{P_i}{P_{i-1}}$). Os retornos apresentam, em sua maioria, autocorrelação antipersistentes com maior destaque para soja em Barreira e o milho em Tucano. Destacando-se das outras dinâmicas, o retorno da commodity de milho em Barreiras mostrou-se autocorrelacionado e pouco persistente e a de boi gordo em Santo Antônio de Jesus foi a única que não apresentou autocorrelação, mostrando-se perfeitamente aleatória.

## 8. CONCLUSÃO

As commodities de boi gordo, milho e soja apresentam maior expressividade no setor agropecuária baiano e diariamente são cotados preços da arroba do boi e saca de 60kg, respectivamente, em cada mercado regional (Praça). Desenvolvemos uma análise descritiva e estimamos os níveis de autocorrelação das séries de índices de preço em cada região produtora das commodities de boi gordo, milho e soja na Bahia ao longo do período de 2017 a 2022.

Percebemos que todos os preços apresentam co-movimentos quando comparamos a mesma commodity. Os índices de preço do milho apresentam características descritivas mais homogêneas, enquanto os preços do boi gordo são descritivamente um pouco mais dispersos. Verificamos na Fig. 2 que a crise econômica causada pela pandemia da COVID-19 gerou grande elevação nos índices de preço (inflação), característica que se percebe ao analisarmos a os valores contidos na Tabela 2.

A análise de autocorrelação mostrou a existência de autocorrelação persistente nos índices de preço e não estacionários. Curiosamente os retornos mostraram-se em sua maioria antipersistentes, com destaque para o retorno da soja, exceto no retorno do boi gordo em Santo Antônio de Jesus que não apresentou autocorrelação e o milho em Barreiras que autocorrelação persistente.

Esperamos que os resultados e as considerações alcançadas deem suporte para a análise e compreensão do mercado baiano de boi gordo milho e soja e favoreçam ao gerenciamente de políticas e ações administrativas que mitiguem os impactos indesejados do mercado econômico global. Além disso, desejamos que esse estudo motive outros pesquisadores a analisarem a dinâmica das séries que envolvem itens agropecuários básicos da alimentação da sociedade brasileira.

***Agradecimentos***

GF Zebende agradece à agência brasileira CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) (*Grant* 310136/2020-2). TP Santana agradece a Universidade Estadual de Feira de Santana e ao Programa de Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente.

## REFERÊNCIAS

Abbott P., de B. A. B. (2011). Recent global food price shocks: Causes, consequences and lessons for African governments and donors. *Journal of African Economies*, *20*. https://doi.org/10.1093/jae/ejr007

Candila V., F. S. (2018). On the volatility spillover between agricultural commodities and Latin American stock markets. *Risk*, *6*(4). https://doi.org/10.3390/risks6040116

Carvalho J.C. Hasegawa M.M., P. L. S. (2020). Price volatility transmissions between brazilian agricultural commodities. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, *58*(3). https://doi.org/10.1590/1806-9479.2020.193763

COEST/SEI. (2022, março 28). *Indicadores da Bahia*. SEI. https://www.sei.ba.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=2192&Itemid=1042

David, S. A., Inácio, C. M. C., Quintino, D. D., & Machado, J. A. T. (2020). Measuring the Brazilian ethanol and gasoline market efficiency using DFA-Hurst and fractal dimension. *Energy Economics*, *85*. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2019.104614

Fasanya I.O., O. T. F. (2020). Modeling return and volatility spillovers among food prices in Nigeria. *Journal of Agriculture and Food Research*, *2*. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2020.100029

Guedes, E. F. (2019). *Modelo computacional para análise de movimento e co-movimentos de mercados financeiros* [Tese de Doutorado]. Centro universitário Senai Cimatec.

Guedes, E. F., Ferreira, P., Dionísio, A., & Zebende, G. F. (2019). An econophysics approach to study the effect of BREXIT referendum on European Union stock markets. *Physica A*, *523*, 1175–1182. https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.04.132

Kristoufek, L., & Vosvrda, M. (2013). Measuring capital market efficiency: Global and local correlations structure. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, *392*(1), 184–193. https://doi.org/10.1016/j.physa.2012.08.003

Peng, C.-K., Buldyrev, S. V, Havtin, S., Simons, M., Stanley, H. E., & Goldbergerz, A. L. (1994). Mosaic organization of DNA nucleotides. Em *PHYSICAL REVIEW E* (Vol. 49, Número 2).

Prass, T. S., & Pumi, G. (2021). On the behavior of the DFA and DCCA in trend-stationary processes. *Journal of Multivariate Analysis*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmva.2020.104703

Quintino, D., Campoli, J., Burnquist, H., & Ferreira, P. (2020). Efficiency of the Brazilian Bitcoin: A DFA Approach. *International journal of financial studies*, *8*(2), 25. https://doi.org/10.3390/ijfs8020025

Santana, T., Horta, N., Chambino, M., Vasconcelos, R., Dias, R. M., & Zebende, G. (2023). *Interdependence and Contagion of Effect in the Agri-cultural Commodities Market: A Bibliometric Analy-sis*. https://doi.org/10.20944/preprints202306.1078.v1

Yaya, O. S., Ogbonna, A. E., Mudida, R., & Abu, N. (2021). Market efficiency and volatility persistence of cryptocurrency during pre- and post-crash periods of Bitcoin: Evidence based on fractional integration. *International journal of finance and economics*, *26*(1), 1318–1335. https://doi.org/10.1002/ijfe.1851

Zebende, G. F., Santos Dias, R. M. T., & de Aguiar, L. C. (2022). Stock market efficiency: An intraday case of study about the G-20 group. Em *Heliyon* (Vol. 8, Número 1). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08808

## AUTOCORRELATION ANALYSIS IN AGRICULTURAL COMMODITIES

**Thiago Pires Santana[1,2] –** tpsantana@uefs.br
**Gilney Figueira Zebende[1,2] –** gfzebende@uefs.br
**Aloísio Machado da Silva Filho[1,2] –** e-mail
[1] Universidade Estadual de Feira de Santana, Campus Feira de Santana – Feira de Santana, BA, Brazil
[2] Programa de Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente, Universidade Estadual de Feira de Santana – Feira de Santana, BA, Brazil

**Abstract.** Live cattle, corn and soy commodities have been the protagonists in the agricultural sector in Bahia State, given the number of producing markets and the volume sold. In this paper, we set out to study the levels of auto-correlation in the main producing regions of corn, live cattle and soy in Bahia. For this purpose, we applied the $\alpha_{DFA}$ exponent to evaluate the auto-correlation, in addition to that we descriptively analyzed the daily price indices from 2018 to 2022 in each market based on measures of central tendency, dispersion and the shape of the frequency distribution. We noticed that there is little discrepancy in the descriptive measures between the indices of each commodity and that the indices are auto-correlated and indicate that previous values interfere with future values.

**Keywords:** Agricultural commodities, auto-correlation analysis, $\alpha_{DFA}$

RGSA – Revista de Gestão Social e Ambiental
ISSN: 1981-982X
Submission date: 03/01/2024
Acceptance date: 05/03/2024
DOI: https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n7-130
Organization: Interinstitutional Scientific Committee
Chief Editor: Éverton Hillig
Assessment: Double Blind Review pelo SEER/OJS

# A STUDY OF THE MARKET OF FAT OX AND CORN IN BAHIA/BRAZIL VIA WEIGHTED NETWORKS BY $\rho_{DCCA}$

**Thiago Santana**[1]
**Rogério Matias**[2]
**Regivaldo Ferreira**[3]
**Aloisio M. da Silva Filho**[4]
**Rosa Galvão**[5]
**Miguel Varela**[6]
**Rui Dias**[7]
**Gilney Zebende**[8]

**ABSTRACT**

**Objective:** This article aims to analyze the connectivity of the fat ox and corn price indices in Bahia

**Theoretical Framework:** The State of Bahia is economically and internationally important in terms of agricultural production in Brazil. Therefore, studying economic indicators and understanding their dynamics is necessary in increasingly competitive markets.

**Method:** To this end, the daily price indices in the main regions of the State of Bahia will be investigated using network analysis weighted by the coefficient of $\rho_{DCCA}(n)$, the formation of clusters, and degree distribution.

**Results and Discussion:** Strong connectivity in the fat ox networks was found for all time scales and for corn only for large scales. The results allowed the unification of the fat ox market to be identified and the trend for price indices to move. Meanwhile, the corn market only has these characteristics for large scales, allowing for better short-term business opportunities.

**Research Implications:** This research provides valuable information for developing public policies, local and international investors, researchers, and those interested in the subject. In addition, it can serve as a bridge to understanding the socioeconomic and environmental effects on the commodities market.

**Keywords:** Agricultural Commodities, Sustainability, Cross-Correlation Coefficient, DCCA, Complex Networks, Governance and Economics.

[1] Earth Sciences and Environment Modeling Program, State University of Feira de Santana, and State University of Feira de Santana, Feira de Santana, BA, Brazil. E-mail: tpsantana@uefs.br
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-6353-1293
[2] State University of Feira de Santana, Feira de Santana, BA, Brazil. E-mail: rgmatias@uefs.br
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-2478-3578
[3] Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Pirituba, SP, Brazil.
E-mail: regivaldo.ferreira@ifsp.edu.br Orcid: https://orcid.org/0000-0003-3245-5141
[4] Earth Sciences and Environment Modeling Program, State University of Feira de Santana, and State University of Feira de Santana, Feira de Santana, BA, Brazil. E-mail: aloisioestatistico@uefs.br
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-8250-1527
[5] Instituto Politécnico de Setúbal, Escola Superior de Ciências Empresariais, Setúbal, Portugal.
E-mail: rosa.galvao@esce.ips.pt Orcid: https://orcid.org/0000-0001-8282-6604
[6] Instituto Superior de Gestão (ISG) (CIGEST), Lisboa, Portugal. E-mail: miguel.varela@isg.pt
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-8388-1250
[7] Instituto Superior de Gestão (ISG) CIGEST, Lisboa, Portugal and Instituto Politécnico da Lusofonia, Lisboa (ESCAD), Portugal. Email: rui.dias@isg.pt Orcid: https://orcid.org/0000-0002-6138-3098
[8] Earth Sciences and Environment Modeling Program, State University of Feira de Santana, and State University of Feira de Santana, Feira de Santana, BA, Brazil. E-mail: gfzebende@uefs.br
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-2420-9805

**ESTUDO DO MERCADO DO BOI GORDO E DO MILHO NA BAHIA/BRAZIL ATRAVÉS DE REDES PONDERADAS POR $\rho_{DCCA}$**

**RESUMO**

**Objetivo**: Este artigo tem como objetivo analisar a conetividade dos índices de preços do boi gordo e do milho na Bahia

**Referencial Teórico**: O Estado da Bahia é importante economicamente e internacionalmente em termos de produção agrícola no Brasil. Portanto, estudar indicadores econômicos e entender a sua dinâmica é necessário em mercados cada vez mais competitivos.

**Método**: Para tanto, serão investigados os índices diários de preços nas principais regiões do Estado da Bahia, utilizando a análise de redes ponderada pelo coeficiente de $\rho_{DCCA}(n)$, a formação de clusters e a distribuição de graus.

**Resultados e Discussão:** Foi encontrada forte conetividade nas redes de boi gordo para todas as escalas de tempo e para o milho apenas para grandes escalas. Os resultados permitiram identificar a unificação do mercado do boi gordo e a tendência de movimentação dos índices de preços. Enquanto isso, o mercado do milho só apresenta essas características para grandes escalas, permitindo melhores oportunidades de negócio no curto prazo.

**Implicações da pesquisa**: Esta pesquisa fornece informações valiosas para o desenvolvimento de políticas públicas, investidores locais e internacionais, pesquisadores e interessados no assunto. Além disso, pode servir de ponte para a compreensão dos efeitos socioeconômicos e ambientais no mercado de commodities.

**Palavras-chave**: Commodities Agrícolas, Sustentabilidade, Coeficiente de Correlação Cruzada, DCCA, Redes Complexas, Governança e Economia.

**ESTUDIO DEL MERCADO DEL BUEY GRASO Y DEL MAÍZ EN BAHIA/BRAZIL A TRAVÉS DE REDES PONDERADAS POR $\rho_{DCCA}$**

**RESUMEN**

**Objetivo**: Este artículo tiene como objetivo analizar la conectividad de los índices de precios del buey gordo y del maíz en Bahía

**Marco Teórico**: El Estado de Bahía es económica e internacionalmente importante en términos de producción agrícola en Brasil. Por lo tanto, estudiar los indicadores económicos y comprender su dinámica es necesario en mercados cada vez más competitivos.

**Método:** Para ello, se investigarán los índices diarios de precios en las principales regiones del Estado de Bahía utilizando el análisis de redes ponderado por el coeficiente de $\rho_{DCCA}(n)$, la formación de clusters y la distribución de grados.

**Resultados y Discusión:** Se encontró una fuerte conectividad en las redes del buey gordo para todas las escalas temporales y para el maíz sólo para las grandes escalas. Los resultados permitieron identificar la unificación del mercado del buey gordo y la tendencia de los índices de precios. Por su parte, el mercado del maíz sólo presenta estas características para las grandes escalas, permitiendo mejores oportunidades de negocio a corto plazo.

**Implicaciones de la investigación:** Esta investigación proporciona información valiosa para el desarrollo de políticas públicas, inversionistas locales e internacionales, investigadores e interesados en el tema. Además, puede servir como puente para la comprensión de los efectos socioeconómicos y ambientales en el mercado de commodities.

**Palabras clave:** Productos Básicos Agrícolas, Sostenibilidad, Coeficiente de Correlación Cruzada, DCCA, Redes Complejas, Gobernanza y Economía.

## 1 INTRODUCTION

According to Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Brazilian Agricultural Research Corporation) (Embrapa), Brazil occupies an important position in the world scenario in terms of the production of agricultural commodities, especially beef and corn (Embrapa, 2021). The Confederation of Agriculture and Livestock of Brazil (CNA) reports that in 2023, agribusiness will contribute 44.2% of the country's gross domestic product (GDP) (CNA, 2024). And in this scenario, the State of Bahia stands out as an important area in the agricultural sector, responsible for a significant part of the country's grain and meat production (COEST/SEI, 2023). The importance of this sector can be seen in the 45.9% of its territory devoted to agricultural production (MAPBIOMAS, 2023), a higher percentage than the national average.

Studying economic indicators and understanding their dynamics is necessary in the face of an increasingly competitive market. Research into the agricultural market has been the subject of numerous studies, given its relevance in guaranteeing the sustainable development goals (SDGs), in particular: zero hunger and sustainable agriculture, decent work and economic growth, reduction of inequalities, responsible consumption and production.

From this perspective, it is possible to mention the research by Santana et al. (Santana, Horta, Chambino, et al., 2023), who evaluated the interdependence of agricultural commodities; Just (Just M., 2022) the interdependence between agricultural commodity markets after COVID-19; Assunção et al. (Assunção et al., 2021), who researched the volatility and correlation of mango prices; Pessoa et al. (Pessoa et al., 2021), who estimated the correlation between chicken, soybean and corn indices; Quintino et al. (Quintino et al., 2021), who measured the correlation of fluctuations in meat price indices in Brazil.

Studying the complexity surrounding the basis of sustainability (economic, social and environmental) is an essential element in balancing this interaction. Understanding economic phenomena is equally important as understanding social and environmental aspects. Knowing the dynamics of the agricultural market is an essential factor in reducing risks and implementing sustainable practices since the commodities of this sector are the basis for human and animal food, energy production (biofuels), and industrial inputs.

Network analysis has been used in various works to analyze the individual and collective dynamics of a set of agents from a wide range of fields: economics and finance (Bonanno et al., 2004; Fukuma, 2013; Mantegna & Stanley, 1999; X. Wang et al., 2021); meteorological variables (Zhao et al., 2023); health (Zhao et al., 2023); co-author networks (Park et al., 2022), among others. Complex Networks developed from advances in Graph Theory studies since a

network is a type of graph with a non-trivial topological structure (Barabási, 2003). Graphs are discrete structures defined and formed by the pair $G(V, E)$, where $V(G) = \{V_1, \dots, V_n\}$ is the finite and non-empty set of elements called vertices/points/nodes and $E(G) = \{E_1, \dots, E_m\}$ is the set of edges/links/lines that connect the elements of $V(G)$. For more information on graph theory, see (Berge, 2001; Santana, Matias, et al., 2023). The various advances in this science have made it possible to formulate metrics capable of extracting robust information from sets of time series (Barabási & Pósfai, 2016).

Therefore, in this research, it is proposed to analyze the connectivity of the fat ox and corn price indices via networks based on the formation of clusters and degree distribution in the period from 2017 to 2023 in the regions with the highest production in the State of Bahia. We identified that there is no research in the scientific literature that analyzes this object of study, considering these aspects, which makes this research a pioneer in the investigation of these indices.

To meet the objective of this research, the weighted networks using the DCCA (Detrended Cross Correlation Analysis) were analyzed, a methodology that has been little explored in economic studies, demonstrating that there is much to be developed. We also propose transforming the correlation coefficient into a distance metric that graphically and more adequately represents the proximity of the vertices of the network and the series. This work brings a new perspective to local economic analysis, understanding its stochastic dynamics as a complex system made up of multi-agents that interact with each other, revealing collective and individual properties.

To meet the research objective, the article is structured into 5 sections: Introduction, Literature Review, Methodology, Results, and Discussion and Conclusions.

## 2 LITERATURE REVIEW

Finding patterns by analyzing data, understanding social, economic and environmental behavior and identifying which variables interfere with its dynamics are research objectives in different science areas. There are currently numerous statistical methods capable of answering questions in a scientific investigation by analyzing the variables involved in the process.

Many socioeconomic studies make use of one of the areas of statistics known in the literature as time series analysis, the main objective of which is to understand a given phenomenon and its evolution over time. Measuring the information contained in a time series requires the efforts of various fields of knowledge, such as mathematics, statistics, and

computing, in addition to the knowledge intrinsic to the nature of the series itself. In this scenario, there is research that supports the study of historical series with the support of complex networks (Bonanno et al., 2004; Clauset et al., 2004; Gomes et al., 2021; Haythornthwaite, 2005; Newman, 2003; Oliveira Filho et al., 2023; Shin et al., 2020).

There are three ways of working with time series as complex networks: the first measures the mutual statistical similarity, which generates proximity networks; the second verifies the convexity of successive observations, with which visibility graphs are obtained; and the third measures the transition probability, which presents the evolution of the network from one state to another, based on Markov chains (Nunes et al., 2021), as discussed in (Zou & Zhang, 2019).

Although network studies began their analysis with small-world networks, the various advances that have taken place in this area now make it possible to formulate metrics capable of extracting relevant information from a time series (Barabási & Pósfai, 2016). The topological structure of a network can have similar characteristics, i.e. a set of vertices that have common properties, establishing what we call communities (Clauset et al., 2004).

In the economic sciences, we can identify the application of network science to model index series connections, volatility, and the contagion effect. Hou and Pan (Hou & Pan, 2022) studied various commodities divided into five categories (metals, light products, energy, meat, and grains), coming to the conclusion that networks become increasingly dense over time and the most intense connections occur between different commodities. Santana et al. (Santana, Horta, Chambino, et al., 2023) show the main agricultural commodities analyzed in interdependence and contagion studies and highlight the importance of real-time information for decision-making, as well as recognizing the concern for sustainability and energy transition in agricultural economics studies.

In the universe of research that have evaluated the properties of agribusiness time series, it is possible to mention König, Macchione Saes, and Schnaider (König et al., 2024), who evaluate the sustainable transition process for a cocoa bean production chain in Bahia and show that cooperation, information exchange and technical support are critical factors in triggering the transition process; Assunção et al. (Assunção et al., 2021) analyzed the correlation between the price of mangoes in Bahia, identifying persistence in the price indices and their returns, and that the cross-correlations increase with the time scale; Pessoa et al. (Pessoa et al., 2021) studied the correlations in the chicken, soybean and corn indices in Brazil, pointing out the absence of cross-correlation for time scales under 30 days, and for longer time scales it was identified higher cross-correlations between chicken x corn and chicken x soybean. In addition, König,

Macchione Saes, and Schnaider (Quintino et al., 2021) evaluated the correlation in the fluctuation of beef, chicken and pork price indices in Brazil in the period before and after the 2016 impeachment, indicating that chicken and pork had a positive correlation before the impeachment, while after the impeachment, the positive correlation for chicken and pork was maintained, as well as the positive correlation for pork and beef in the long term. Nunes et al. (Nunes et al., 2021) analyzed the networks formed by the chicken, corn and soybean price indices in Brazil and concluded that the chicken networks were more integrated than the corn and soybean networks. Santana, Silva Filho, and Zebende (Santana, Silva Filho, et al., 2023) studied the autocorrelations in the commodity price indices for fat ox, corn and soybeans in Bahia and identified persistence in these indices.

Due to globalization, economic markets are increasingly connected and subject to interference, especially from stronger markets. Despite the growing number of studies in this area, dependency analysis is still little explored, especially via weighted networks by the coefficient $\rho_{DCCA}(n)$.

## 3 METHODS

This section presents the materials and methods used to analyze the connectivity of the networks formed by the price indices of the fat ox and corn commodities from 2017 to 2023.

### 3.1 MATERIALS

This study used the commodity price indices for fat ox and corn made available by the Department of Agriculture, Livestock, Irrigation, Fishing, and Aquaculture of the State of Bahia (Seagri, 2022).

The following were identified: 5 corn-producing markets (Adustina - ADU, Barreiras - BAR, Irecê - IRE, Ribeira do Pombal - RPO, and Tucano - TUC) and six fat ox markets (Barreiras - BAR, Feira de Santana - FSA, Itapetinga - ITA, Jequié - JEQ, Salvador - SSA, Santo Antônio de Jesus - STJ) which have daily price quotations.

The network composed of the fat ox and corn indices in isolation for the period from 2017 to 2023 was analyzed. After refining the data, each series had an average of approximately 1,300 values. The price indices are quoted in local currency (Brazilian Real, R$).

## 3.2 METHODOLOGY

The weighted complex network was analyzed with the trendless cross-correlation coefficient $\rho_{DCCA}(n)$ developed by (Zebende, 2011) to study the fluctuations of time series in a nonstationary regime on different time scales.

The methodological procedures were carried out in two stages. The first involved data collection and pre-processing: tabulation, selection, pairing of series, construction, and analysis of graphs and their respective correlations.

The method for cross-correlation analysis used in this article was developed by (Podobnik & Stanley, 2008) and based on the DCCA (Zebende, 2011) and the DFA (Peng, 2013), denoted by the following expression:

$$\rho_{DCCA}(n) \equiv \frac{F^2_{DCCA}(n)}{F_{DFA_x}(n) \times F_{DFA_y}(n)}$$

(1)

where:

the coefficient $\rho_{DCCA}(n)$ between two series $x_i$ and $y_i$ varies on the time scale of $4 \leq n \leq {}^{N}/_{4}$, so that $N$ indicates the size of the series.

Equation (1) presents dimensionless results that characterize cross-correlations and anti-correlations into strong, average and weak (see Table A2).

The second stage began with an analysis of the correlation coefficient between the indices in order to build the networks (graphs). It was assumed that each index represents a vertex of the graph, and the correlation coefficient is the weight of the edge that associates them. In order to meet the definitions and geometric properties of a graph, it is proposed to transform the trendless cross-correlation coefficient into a Euclidean distance (Lima, 2007; Loibel, 2007) using the function:

$$d_{x,y}(n) = 1 - \rho_{DCCA_{x,y}}(n) \qquad (2)$$

Equation (2) transforms the correlation coefficient into a distance, where $d_{x,y}(n) = 0$ indicates a perfect positive correlation, $d_{x,y}(n) = 1$ no correlation, and $d_{x,y}(n) = 2$ anti-correlation or perfect negative correlation.

Then, it was analyzed the formation of clusters in the network at each time scale **n**, using the concept of modularity as a measure that quantifies the quality of the clusters of vertices in a network (Newman, 2003). For this analysis, the algorithm defined by (Brandes et al., 2008), which seeks to form clusters with maximum modularity, was used. The networks for each time scale were built with igraph/R-project using the "cluster_optimal" function (Csardi & Nepusz, 2006).

Nineteen network structures covering the scale from n=4 to n=280 were built for each commodity. For all these networks, vertex connectivity was evaluated using degree distribution analysis (number of connected edges).

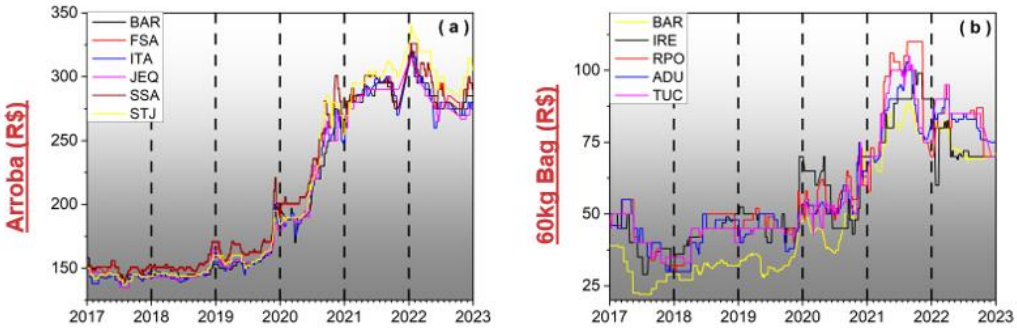
## 4 RESULTS AND DISCUSSION

The results obtained contribute to the discussion of the analysis of community formation and degree distribution of the network formed by the fat ox and corn indices in order to understand the connectivity and dynamics of the fluctuations in these time series.

Figure 1 shows the daily price of the commodity indices for fat ox $(a)$ and corn $(b)$. It shows the prices in each region, with values in reais for the arroba (an arroba is equivalent to 15 kg) of fat ox and a 60 kg bag of corn.

**Figure 1**

*Evolution of commodity prices for fat ox* $(a)$ *and corn* $(b)$*, 2017 – 2023.* $(a)$*: Shows the price of fat ox for the BAR, FSA, ITA, JEQ, SSA, STJ indices;* $(b)$*: Shows the price of corn for the ADU, BAR, IRE, RPO, TUC indices.*




Graph (a) in Figure 1 shows that the indices have slightly dispersed values between them and that the greatest fluctuations occur in similar periods. Graph (b) shows that the price indices for bags of corn are dispersed among themselves, with the Barreiras region having the lowest indices during the period. Both indices showed greater dispersion in fluctuations at the beginning of the pandemic caused by COVID-19 (March 11, 2020, (WHO, 2024)), especially if we consider the period from 2020 to 2022.

At the beginning of 2022, there was instability in the prices of both commodities due to the conflict between Russia and Ukraine and their influence on the world scenario. Research such as that of (Fang & Shao, 2022; Fiszeder & Małecka, 2022; Just M., 2022; Wu et al., 2023) shows the effect of this conflict on the economy.

Table 1 shows the descriptive analysis of each index, showing the size of the series (N), Mean, Coefficient of variation, Median, Minimum, and Maximum. Corn prices have greater variability when comparing the regions, while the fat ox indices have similar measures. The coefficient of variation is high, which is explained by the economic crisis caused by COVID-19 and the consequent rise in prices, as also observed in other studies (Chakrabarti et al., 2021; Despard et al., 2020; Just M., 2022; Kramarova et al., 2022; Privara, 2022; Santana, Horta, Revez, et al., 2023; Q. Wang et al., 2022). Barreiras has the best infrastructure for agribusiness in Bahia (Fernandes et al., 2014; Santana, Silva Filho, et al., 2023), and even with support, the pandemic has imposed strong variability in commodity prices for fat ox and corn with a coefficient of variation of 30.50% and 43.35%, respectively. The price indices for fat ox averaged around R$ 206.67, with an average coefficient of variation of 30.87%, a minimum of

R$ 135.00 and a maximum of R$ 340.00, while corn averaged around R$ 56.40, with an average coefficient of variation of 36.13%, a minimum of R$ 22.00, and a maximum of R$ 110.00.

**Table 1**

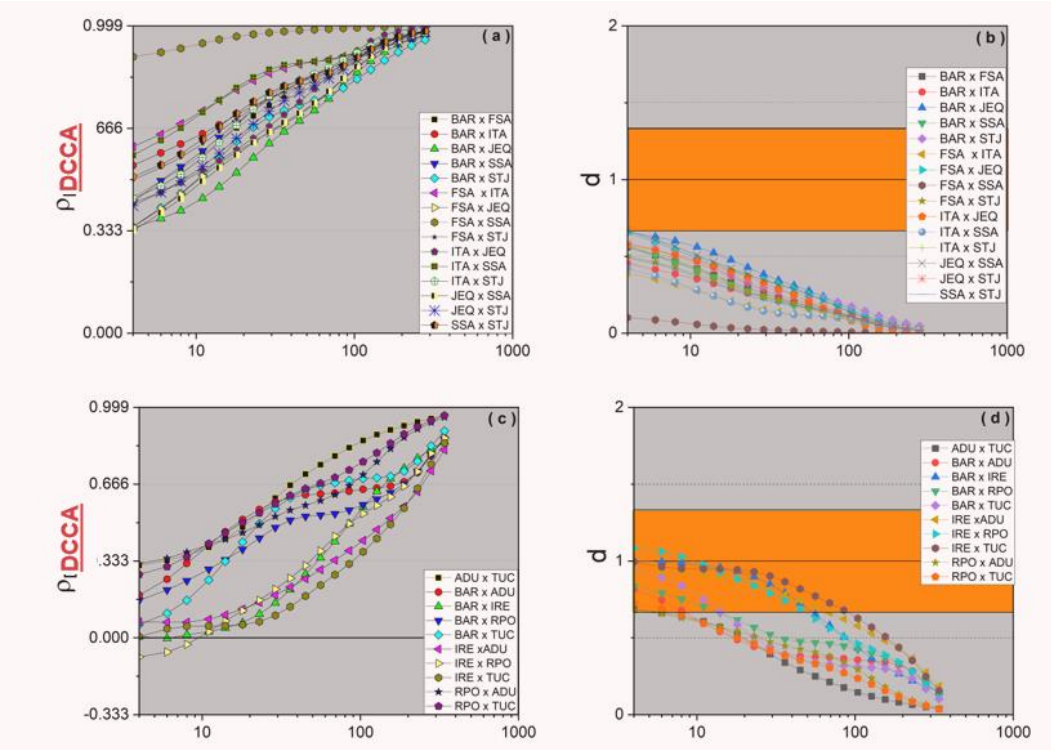
*Descriptive statistics of price indices. Table A2: Cross-correlation coefficient qualification.*

| Commodity | Index | N | Mean | Coefficient of variation | Median | Minimum | Maximum |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Fat ox | BAR | 1291 | 203.08 | 30.50% | 162.00 | 140.00 | 320.00 |
| | FSA | 1291 | 210.91 | 29.93% | 170.00 | 140.00 | 325.00 |
| | ITA | 1291 | 202.28 | 31.22% | 162.00 | 136.00 | 320.00 |
| | JEQ | 1291 | 202.01 | 30.46% | 165.00 | 135.00 | 315.00 |
| | SSA | 1291 | 211.94 | 29.76% | 171.00 | 141.00 | 326.00 |
| | STJ | 1291 | 209.80 | 33.35% | 164.00 | 137.00 | 340.00 |
| Corn | ADU | 1366 | 57.89 | 33.96% | 50.00 | 30.00 | 103.00 |
| | BAR | 1366 | 48.07 | 43.35% | 38.50 | 22.00 | 89.00 |
| | IRE | 1366 | 56.85 | 31.56% | 50.00 | 28.00 | 100.00 |
| | RPO | 1366 | 60.61 | 36.46% | 50.00 | 30.00 | 110.00 |
| | TUC | 1366 | 58.59 | 35.30% | 50.00 | 33.00 | 105.00 |

Figure 2 shows the correlation coefficient between the pairs of fat ox and corn indices respectively (see graphs *a* and *c*). Graphs *b* and d show the dynamics of the edge values of the weighted networks $(d_{x,y}(n))$ from $\rho_{DCCA}(n)$.

**Figure 2**

*Evolution fat ox commodity prices* $(a)$ *and corn* $(b)$*, 2017 – 2023.* $(a)$*: Shows the price of fat ox for the BAR, FSA, ITA, JEQ, SSA, STJ indices;* $(b)$*: Shows the price of corn for the ADU, BAR, IRE, RPO, TUC indices*

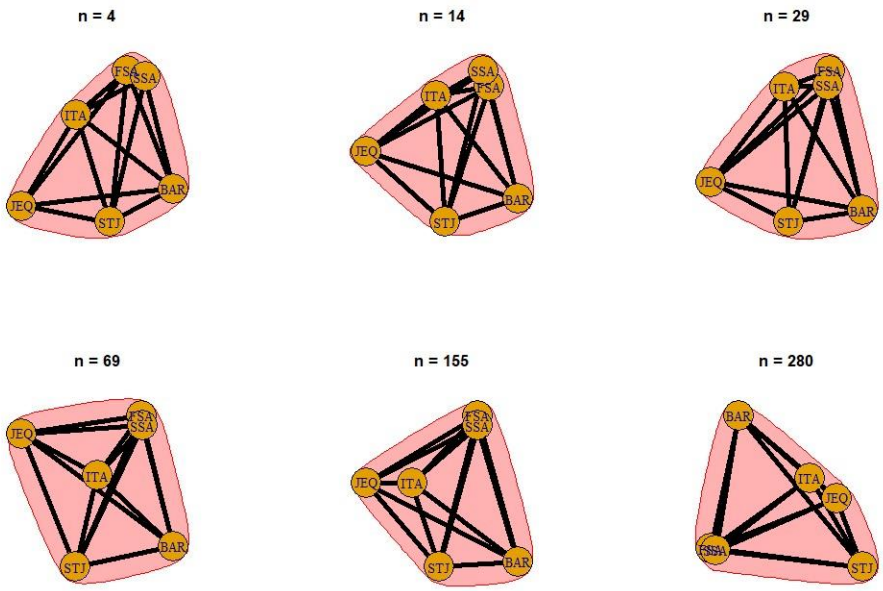



The fat ox and corn indices show an average and weak correlation, respectively, for small scales and a strong correlation for large scales. This information is evident in the sizing of the edges so that as the correlation increases, the value of the edge decreases, and the vertices move closer together. The range highlighted in graphs b and d shows the interval where edges are excluded, i.e. where correlations are weak.

Figure 3 and Figure 4 show the networks constructed for the fat ox and corn indices, respectively, with the identification of communities along the time scale $n$. A total of 19 networks were evaluated for both indices, and the figures show the networks for small and large scales.

**Figure 3**

*Complex network for small and large scales for fat ox commodities.*

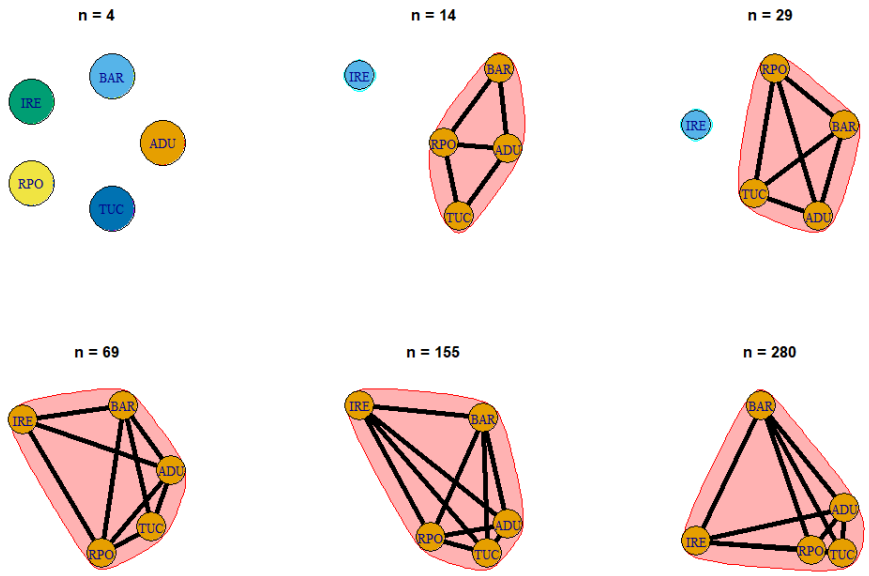



From the smallest scales, the complex network of fat ox indices presents a single community, showing that the network is strongly connected and has dynamic movements. Also noteworthy is the behaviour of the FSA and SSA indices (vertices), as well as the ITA and JEQ, which are increasingly integrated over time. This result is in line with research by Loibel (2007), which also identified unification on the national and international scene (De Oliveira Neto et al., 2022).

The unification of this market favours its stability and provides for the development of public policies that support the sector, private sector investments, and other factors that feed the production chain. Even after the crisis caused by COVID-19, network connectivity remains strong, especially for large scales. However, the high connectivity of the network is not favourable in times of crisis (Alvarez-Ramirez et al., 2008; Dias et al., 2021), as this property inhibits the possibility of portfolio diversification in the same sector (Dias et al., 2022; Zebende et al., 2022).

**Figure 4**

*Complex network for small and large scales for corn commodities.*



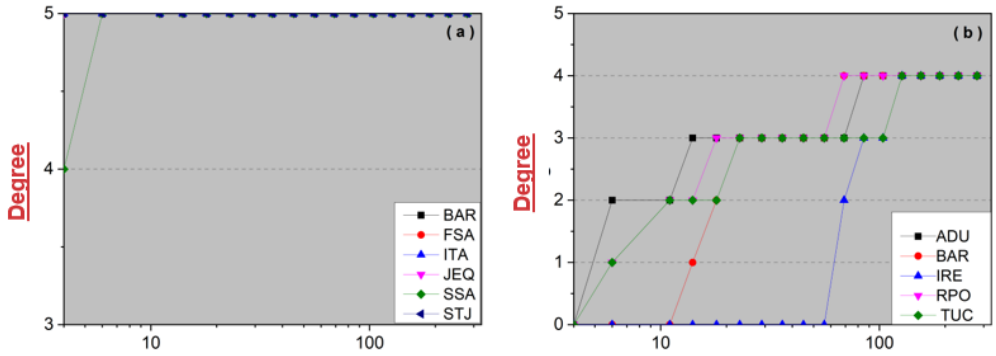

The networks formed by the corn indices show an increase in the number of communities and their connectivity as the time scale increases. For the time scale of: $n = 4$ the indices fluctuate differently and appear isolated; $n = 6$ and $n = 8$ there is a formation of community; $n = 11, 14, 18, 23, 29, 36$ and 45 IRE remains isolated, while the other regions form a community; $n \geq 56$ all the vertices remain connected, forming a single community. For scales shorter than 56 days, the indices do not fluctuate together, and this dynamic can indicate better business and investment opportunities. For large scales, the connectivity of the network is strong, which showed the trend for movements.

The evolution of the network of relationships indicates opportunities for small scales, as does the identification of the dynamics of network fluctuation and the time it takes for this volatility to be transmitted (contagion effect). The contagion effect is understood as the transmission of fluctuation between indices, but it is also known in the literature as Overflow, Spillover or Transmission (Carvalho J.C. Hasegawa M.M., 2020; Just M., 2022; Santana, Horta, Chambino, et al., 2023; Santana, Horta, Revez, et al., 2023; Sultonov, 2021; Thenmozhi M., 2020). The volatility of the corn market has been studied extensively in recent years (Santana, Horta, Chambino, et al., 2023), as it is the basis for human food, animal feed, and biofuels.

Figure 5 shows the degree of each vertex along the time scale, where the degree of the vertices in the fat ox and corn networks vary from 0 to 5 and 0 to 4, respectively.

**Figure 5**

*Degree of each vertex for fat ox* $(a)$ *and corn* $(b)$ *networks.*




The networks representing the fat ox indices have highly connected vertices with well-distributed values. This showed how homogeneous the network is and that interference in one of the agents has immediate repercussions on the network dynamics, implying a contagion effect on proportional scales.

Local analysis of the degree distribution in the corn network shows that it becomes connected at scales greater than 56 days and that maximum connectivity occurs at scales greater than 100 days. ADU, RPO, TUC, BAR, and IRE represent the indices of the regions with the greatest connectivity in the system, in that order. For small scales (less than 56) the ADU vertex shows greater connectivity with the system, demonstrating its influence on the dynamics of the network.

The global and local analysis of network connectivity and cluster formation dynamics provides a systemic understanding of the fluctuation of price indices in the State of Bahia. Knowing the intensity and influence of a vertex on the behaviour of its neighbours and, consequently, the network shows possible ways to predict results and mitigate unwanted disturbances in the system.

This article provides a new understanding of the price dynamics of fat ox and corn commodities in Bahia and shows an innovative approach to sizing edges based on correlation coefficients. Networks based on time series are dynamic structures, so studying these indices

requires analysis, evaluation and discussion to maintain or reformulate the hypotheses that characterize these markets.

## 5 CONCLUSION

The objective of this study was to evaluate the time series of fluctuations in the price indices for fat ox and corn in the main regions of the State of Bahia, Brazil, to understand the space-time dynamics of these indices with practical perspectives for social and environmental intervention. In order to achieve this objective, the trendless cross-correlation was measured with the coefficient $\rho_{DCCA}(n)$ for each pair of indices of the same commodity, this coefficient was then transformed into a weight measure for the edges of the networks.

The descriptive measures show that the corn price indices have greater variability when compared by region, indicating more independent fluctuations. On the other hand, the prices of fat ox present a greater regularity and proximity in the measures. The analysis of the communities and connectivity in the fat ox network shows that the market is strongly connected at any scale and that there are synchronous fluctuations between the indices. This scenario indicates the possibility of contagion within and between the markets evaluated.

In the corn indices, the formation of communities showed that there are opportunities for diversification at small scales (n < 56 days) as some markets have proved to be isolated and independent. However, for large scales (n > 56 days) the corn network becomes strongly connected. The indices for Adustina, Ribeira do Pombal and Tucano are closer on the whole time scale, a characteristic explained by their geographical proximity (see Figure A1).

The results also show moderate agreement between the two networks for large scales. In this way, it is possible to identify that, in the long term, indices are subject to transmitting or receiving repercussions from risks, thus influencing the social and environmental dynamics.

In addition to the findings highlighted, this work opens up new possibilities for research involving the use of complex networks considering social and economic aspects, market resilience, potential impacts of market integration, and climate interference. In the local context, another aspect that could be explored in future studies is the analysis of the fat ox and corn indices and their implications for macroeconomic dynamics (National - Brazil). In addition, a broader analysis of the networks before, during, and after the COVID-19 pandemic is necessary to complement and provide a better understanding of the economic scenario in Bahia and its implications in the face of periods of instability.

**ACKNOWLEDGEMENTS**

The authors are grateful for the comments and suggestions from anonymous reviewers that helped improve the quality of the manuscript. Thiago Santana thanks CAPES (Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel) and PPGM (Postgraduate Program in Modeling in Earth and Environmental Sciences). Rui Dias is pleased to acknowledge the financial support from Instituto Superior de Gestão (ISG) [ISG - Business & Economics School], CIGEST.

The authors are grateful for the comments and suggestions from reviewers that helped improve the quality of the manuscript. Rui Dias is pleased to acknowledge the financial support from Instituto Superior de Gestão (ISG) [ISG - Business & Economics School], CIGEST.

## REFERENCES

Alvarez-Ramirez, J., Alvarez, J., & Rodriguez, E. (2008). Short-term predictability of crude oil markets: A detrended fluctuation analysis approach. Energy Economics, 30(5), 2645–2656. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2008.05.006

Assunção, B. de F., Barreto, I. D. de C., Stosic, T., & Stosic, B. (2021). Correlações em séries temporais de preços de manga produzida no Vale do São Francisco. Research, Society and Development, 10(12), e266101220460. https://doi.org/10.33448/rsd-v10i12.20460

Barabási, A.-L. (2003). Linked: How everything is connected to everything else and what it means for business, science and everyday life (1st ed., Vol. 1). Plume Books.

Barabási, A.-L., & Pósfai, Márton. (2016). Network science. Cambridge University Press. http://barabasi.com/networksciencebook/

Berge, C. (2001). The theory of graphs. Courier Corporation.

Bonanno, G., Caldarelli, G., Lillo, F., Micciche, S., Vandewalle, N., & Mantegna, R. N. (2004). Networks of equities in financial markets. The European Physical Journal B - Condensed Matter, 38(2), 363–371. https://doi.org/10.1140/epjb/e2004-00129-6

Brandes, U., Delling, D., Gaertler, M., Gorke, R., Hoefer, M., Nikoloski, Z., & Wagner, D. (2008). On Modularity Clustering. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 20(2), 172–188. https://doi.org/10.1109/TKDE.2007.190689

Carvalho J.C. Hasegawa M.M., P. L. S. (2020). Price volatility transmissions between brazilian agricultural commodities. Revista de Economia e Sociologia Rural, 58(3). https://doi.org/10.1590/1806-9479.2020.193763

Chakrabarti, P., Jawed, M. S., & Sarkhel, M. (2021). COVID-19 pandemic and global financial market interlinkages: a dynamic temporal network analysis. Applied Economics, 53(25), 2930–2945. https://doi.org/10.1080/00036846.2020.1870654

Clauset, A., Newman, M. E. J., & Moore, C. (2004). Finding community structure in very large networks. Physical Review E, 70(6), 066111. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.70.066111

CNA. (2024, March 5). Puxado pelo crescimento recorde de 15,1% da agropecuária, PIB brasileiro fecha 2023 com alta de 2,9%. Confederação Da Agricultura e Pecuária Do Brasil . https://cnabrasil.org.br/publicacoes/puxado-pelo-crescimento-recorde-de-15-1-da-agropecuaria-pib-brasileiro-fecha-2023-com-alta-de-2-9

COEST/SEI. (2023, March 28). Indicadores da Bahia. Superintedência de Estudos Econômicos e Sociais Da Bahia. https://www.sei.ba.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=2192&Itemid=1042

Csardi, G., & Nepusz, T. (2006). The igraph software package for complex network research. InterJournal, Complex Systems. https://igraph.org

De Oliveira Neto, O. J., Santana Figueiredo, R., & Wander, A. E. (2022). PRICE INTERDEPENDENCE IN THE INTERNATIONAL AND BRAZILIAN BEEF CATTLE MARKET. Revista Econômica Do Nordeste, 53(2), 73–89. https://doi.org/10.61673/ren.2022.1202

Despard, M., Chun, Y., Grinstein-Weiss, M., & Roll, S. (2020). COVID-19 job and income loss leading to more hunger and financial hardship. Brookings.

Dias, R., Alexandre, P., Heliodoro, P., Santos, H., Farinha, A. R., & Santos, M. C. (2021). The 2020 Oil Price War Has Increased Integration Between G7 Stock Markets and Crude Oil WTI. 13–25. https://doi.org/10.31410/ERAZ.S.P.2021.13

Dias, R., Pereira, J. M., & Carvalho, L. C. (2022). Are African Stock Markets Efficient? A Comparative Analysis Between Six African Markets, the UK, Japan and the USA in the Period of the Pandemic. Nase Gospodarstvo (English)., 68(1), 35–51. https://doi.org/10.2478/ngoe-2022-0004

Embrapa. (2021, June 1). Brasil é o quarto maior produtor de grãos e o maior exportador de carne bovina do mundo, diz estudo. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária . https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/62619259/brasil-e-o-quarto-maior-produtor-de-graos-e-o-maior-exportador-de-carne-bovina-do-mundo-diz-estudo

Fang, Y., & Shao, Z. (2022). The Russia-Ukraine conflict and volatility risk of commodity markets. Finance Research Letters, 50, 103264. https://doi.org/10.1016/j.frl.2022.103264

Fernandes, M., de Castro, A., & da Silva Filho, A. M. (2014). Quantificando a Influência do Mercado de Câmbio nos Preços do Milho e da Soja no Município de Barreiras. C&P, 182, 42–49.

Fiszeder, P., & Małecka, M. (2022). Forecasting volatility during the outbreak of Russian invasion of Ukraine: application to commodities, stock indices, currencies, and cryptocurrencies. Equilibrium. Quarterly Journal of Economics and Economic Policy, 17(4), 939–967. https://doi.org/10.24136/eq.2022.032

Fukuma, W. (2013). O potencial de redes complexas para análise do mercado de ações. CENTRO UNIVERSITA´ RIO DA FEI.

Gomes, S. C., Vinga, S., & Henriques, R. (2021). Spatiotemporal Correlation Feature Spaces to Support Anomaly Detection in Water Distribution Networks. Water (Basel), 13(18), 2551. https://doi.org/10.3390/w13182551

Haythornthwaite, C. (2005). Social networks and Internet connectivity effects. Information, Communication & Society, 8(2), 125–147. https://doi.org/10.1080/13691180500146185

Hou, L., & Pan, Y. (2022). Evaluating the connectedness of commodity future markets via the cross-correlation network. Frontiers in Physics, 10. https://doi.org/10.3389/fphy.2022.1017009

Just M., E. K. (2022). Dynamic spillover transmission in agricultural commodity markets: What has changed after the COVID-19 threat? Economics Letters, 217. https://doi.org/10.1016/j.econlet.2022.110671

König, C. C., Macchione Saes, M. S., & Schnaider, P. S. B. (2024). How and why did the transition process towards a fully sustainable production of cocoa beans in Bahia (Brazil) take place? International Food and Agribusiness Management Review, 1–16. https://doi.org/10.22434/ifamr2023.0049

Kramarova, K., Švábová, L., & Gabrikova, B. (2022). Impacts of the Covid-19 crisis on unemployment in Slovakia: a statistically created counterfactual approach using the time series analysis. Equilibrium. Quarterly Journal of Economics and Economic Policy, 17(2), 343–389. https://doi.org/10.24136/eq.2022.012

Lima, E. L. (2007). Espaços métricos (1st ed.). IMPA.

Loibel, G. (2007). Introdução à Topologia. Unesp.

Mantegna, R., & Stanley, E. (1999). Introduction to Econophysics: Correlations and Complexity in Finance (1st ed., Vol. 1). Cambridge University Press.

MAPBIOMAS. (2023). Plataforma MAPBIOMAS uso e cobertura. MAPBIOMAS/Mapas e Dados. https://plataforma.brasil.mapbiomas.org

Newman, M. E. J. (2003). The Structure and Function of Complex Networks. SIAM Review, 45(2), 167–256.

Nunes, J. E. de O., Silva, J. M. da, Araújo, L. da S., Moreira, G. R., Stosic, T., & Stosic, B. (2021). Análise de grafos de visibilidade do mercado brasileiro de soja, milho e carne de frango. Research, Society and Development, 10(1), e39210111478. https://doi.org/10.33448/rsd-v10i1.11478

Oliveira Filho, F. M., Guedes, E. F., & Rodrigues, P. C. (2023). Networks analysis of Brazilian climate data based on the DCCA cross-correlation coefficient. PLOS ONE, 18(9), e0290838. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0290838

Park, J., Park, J., & Choi, Y. (2022). Identification of research communities of environmental engineering and their evolution using co-author network analysis. Environmental Modelling & Software, 149, 105320. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105320

Peng, G. (2013). A new lattice model of the traffic flow with the consideration of the driver anticipation effect in a two-lane system. Nonlinear Dynamics, 73(1–2), 1035–1043. https://doi.org/10.1007/s11071-013-0850-7

Pessoa, R. V. S., de Carvalho Barreto, I. D., da Silva Araújo, L., Moreira, G. R., Stosic, T., & Stosic, B. (2021). Correlações em séries temporais de preços de frango, soja e milho. Research, Society and Development, 10(4), e20610414019. https://doi.org/10.33448/rsd-v10i4.14019

Podobnik, B., & Stanley, H. E. (2008). Detrended cross-correlation analysis: A new method for analyzing two nonstationary time series. Physical Review Letters, 100(8). https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.084102

Privara, A. (2022). Economic growth and labour market in the European Union: lessons from COVID-19. Oeconomia Copernicana, 13(2), 355–377. https://doi.org/10.24136/oc.2022.011

Quintino, D., Telo da Gama, J., & Ferreira, P. (2021). Cross-Correlations in Meat Prices in Brazil: A Non-Linear Approach Using Different Time Scales. Economies, 9(4), 133. https://doi.org/10.3390/economies9040133

Santana, T. P., Horta, N. R., Chambino, M. R., Dias, R. M. T. S., Vasconcelos, R. N., Filho, A. M. da S., & Zebende, G. F. (2023). Interdependence and contagion effects in agricultural commodities markets: A bibliometric analysis, implications, and insights for sustainable development. Equilibrium. Quarterly Journal of Economics and Economic Policy, 18(4), 907–940. https://doi.org/10.24136/eq.2023.029

Santana, T. P., Horta, N., Revez, C., Dias, R. M. T. S., & Zebende, G. F. (2023). Effects of Interdependence and Contagion on Crude Oil and Precious Metals According to ρDCCA: A COVID-19 Case Study. Sustainability, 15(5), 3945. https://doi.org/10.3390/su15053945

Santana, T. P., Matias, R. G., & Santana, P. H. G. (2023). Conceitos da Teoria dos Grafos no desenvolvimento do raciocínio lógico aplicados aos jogos com estudantes da EJA. Boletim Cearense de Educação e História Da Matemática, 10(29), 1–19. https://doi.org/10.30938/bocehm.v10i29.10347

Santana, T. P., Silva Filho, A. M. da, & Zebende, G. F. (2023). Análise de autocorrelação em commodities agropecuárias. Anais Do(a) Anais Do Encontro Nacional de Modelagem Computacional e Encontro de Ciência e Tecnologia Dos Materiais. https://doi.org/10.29327/1340957.26-12

Seagri. (2022). Cotação Agrícola. Secretaria Da Agricultura, Pecuária, Irrigação, Pesca e Aquicultura.

Shin, K.-H., Lim, G., & Min, S. (2020). Dynamics of the Global Stock Market Networks Generated by DCCA Methodology. Applied Sciences, 10(6), 2171. https://doi.org/10.3390/app10062171

Sultonov, M. (2021). External Shocks and Volatility Overflow among the Exchange Rate of the Yen, Nikkei, TOPIX and Sectoral Stock Indices. Journal of Risk and Financial Management, 14(11), 560. https://doi.org/10.3390/jrfm14110560

Thenmozhi M., M. S. (2020). Crude Oil Volatility Transmission Across Food Commodity Markets: A Multivariate BEKK-GARCH Approach. Journal of Emerging Market Finance, 20(2). https://doi.org/10.1177/0972652720927623

Wang, Q., Yang, X., & Li, R. (2022). The impact of the COVID-19 pandemic on the energy market – A comparative relationship between oil and coal. Energy Strategy Reviews, 39, 100761. https://doi.org/10.1016/j.esr.2021.100761

Wang, X., Xu, Z., Su, S.-F., & Zhou, W. (2021). A comprehensive bibliometric analysis of uncertain group decision making from 1980 to 2019. Information Sciences, 547, 328–353. https://doi.org/10.1016/j.ins.2020.08.036

WHO. (2024). Coronavirus disease. World Health Organization . https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/coronavirus-disease-(covid-19)

Wu, F., Zhan, X., Zhou, J., & Wang, M. (2023). Stock market volatility and Russia–Ukraine conflict. Finance Research Letters, 55, 103919. https://doi.org/10.1016/j.frl.2023.103919

Zebende, G. F. (2011). DCCA cross-correlation coefficient: Quantifying level of cross-correlation. Physica A, 390(4), 614–618. https://doi.org/10.1016/j.physa.2010.10.022

Zebende, G. F., Santos Dias, R. M. T., & de Aguiar, L. C. (2022). Stock market efficiency: An intraday case of study about the G-20 group. In Heliyon (Vol. 8, Issue 1). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08808

Zhao, Y., Qu, D., Chen, S., & Chi, X. (2023). Network analysis of internet addiction and depression among Chinese college students during the COVID-19 pandemic: A longitudinal study. Computers in Human Behavior, 138, 107424. https://doi.org/10.1016/j.chb.2022.107424

Zou, S., & Zhang, T. (2019). Multifractal Detrended Cross-Correlation Analysis of Electricity and Carbon Markets in China. Mathematical Problems in Engineering, 2019, 1–13. https://doi.org/10.1155/2019/9350940

## APPENDIX A

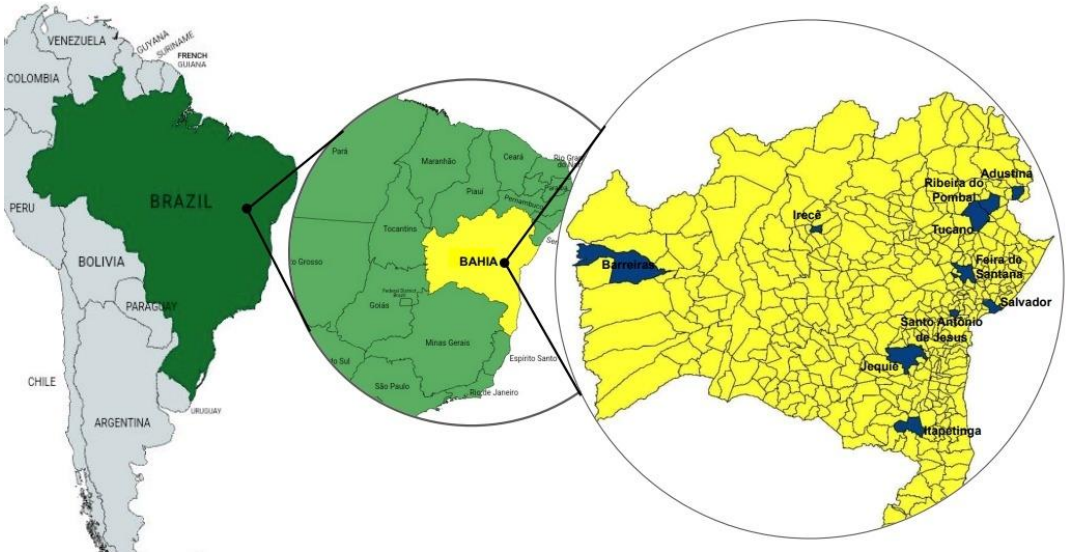
**Table 2**

*Cross-correlation coefficient $\rho_{DCCA}(n)$ and characterization of the type of correlation.*

| $\boldsymbol{\rho_{DCCA}(n)}$ | Description |
|---|---|
| $-0{,}999 \vdash -0{,}666$ | Strong cross-anticorrelation |
| $-0{,}666 \vdash -0{,}333$ | Average cross-anticorrelation |
| $-0{,}333 \vdash 0{,}000$ | Weak cross-anticorrelation |
| $0{,}000 \vdash 0{,}333$ | Weak cross-correlation |
| $0{,}333 \vdash 0{,}666$ | Average cross-correlation |
| $0{,}666 \vdash 0{,}999$ | Strong cross-correlation |

**Figure 6**

*Illustration identifying the producing regions of cattle and corn commodities in Bahia-Brazil that have daily prices according to Seagri.*



RGSA – Revista de Gestão Social e Ambiental
ISSN: 1981-982X
Submission date: 08/19/2024
Acceptance date: 10/21/2024
DOI: https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n11-234
Organization: Interinstitutional Scientific Committee
Chief Editor: Ana Carolina Messias de Souza Ferreira da Costa
Assessment: Double Blind Review pelo SEER/OJS

# ECONOPHYSICS, STATE OF THE SCIENCE AND BIBLIOGRAPHIC PRODUCTION: A BIBLIOMETRIC ANALYSIS

**Rui Manuel dos Santos Vigário Rodrigues**[1]
**Thiago Pires Santana**[2]
**Rui Manuel Teixeira Santos Dias**[3]
**Aloísio Machado da Silva Filho**[4]
**Rosa Galvão**[5]
**Gilney Figueira Zebende**[6]
**Sidalina Gonçalves**[7]

**ABSTRACT**

**Objective:** This article aims to investigate the state of the art regarding the scientific production of Econophysics as a field of study. The aim is to map the annual production of articles, types of documents, most relevant authors, most productive countries, institutions, journals, scientific collaboration networks, and associated themes and trends.

**Theoretical Framework:** Econophysics applies physics procedures to analyze financial markets and solve economic problems, using tools such as fractal theory and Brownian motion. The term Econophysics was created by H. Eugene Stanley in 1995. Bibliometric mapping, conducted with software such as Bibliometrix and R-Project, is essential for understanding trends in the academic literature on Econophysics.

**Method:** Bibliometric analysis was used to map the existing scientific literature on the field of Econophysics. This science is described as a method that employs the resources of mathematics, statistics, and computing to bring the scientific memory of a specific area of knowledge. The Scopus database was used to collect data on the main publications during the period from 1996 to 2024. The Bibliometrix and R-Project software produced keyword co-occurrence maps, citation analysis, and collaboration networks between authors and institutions. The main metrics analyzed include the number of publications per year, the main thematic areas, the sources of publications, the most cited authors, and the geographical distribution of scientific contributions.

**Results and Discussion:** A total of 1,805 publications between 1996 and 2024 (June), of which 1,450 are scientific articles related to Econophysics. The data suggest a consistent increase in article publications until 2006, after which there was stability between 80 to 100 articles published annually. The percentage of international collaboration is 20.83%, highlighting the collaborative aspect among various countries. The average number of citations of the articles is 22.41%. When analyzing the co-occurrence of keywords, the three main thematic groups were identified—finance, physics, and economics—and the most frequently used terms were trade and financial markets. 793 articles were published by the journal Physica A, which leads the publication ranking. Zhou, Stanley,

[1] Instituto Politécnico de Setúbal, Setúbal, Portugal. E-mail: rvigario44@gmail.com
Orcid: https://orcid.org/0009-0003-9801-694X
[2] State University of Feira de Santana, Bahia, Brazil. E-mail: psantana@uefs.br
Orcid: https:// orcid.org/0000-0002-6353-1293
[3] Polytechnic Institute of Lusofonia, Lisboa, Portugal. E-mail: rui.dias@ipluso.pt
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-6138-3098
[4] State University of Feira de Santana, Bahia, Brazil. E-mail: aloisioestatistico@uefs.br
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-8250-1527
[5] Instituto Politécnico de Setúbal, Setúbal, Portugal. E-mail: rosa.galvao@esce.ips.pt
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-8282-6604
[6] State University of Feira de Santana, Bahia, Brazil. E-mail: gfzebende@uefs.br
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-2420-9805
[7] Instituto Politécnico de Setúbal, Setúbal, Portugal, sidalina.goncalves@esce.ips.pt
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-4256-9479

and Mantegna are the most productive and highly referenced writers. And the nations that contribute the most to the development of Econophysics are China, the United States of America, and Japan.

**Research Implications:** It is a broader view of the evolution of Econophysics, the main trends, and the areas of research that have emerged in recent decades. It helps understand how physics algorithms can be used to solve economic problems, promoting a more equitable economy.

**Originality/Value:** This study pioneers the conducting of a comprehensive bibliometric analysis of the literature on econophysics, a relatively new field that combines physical science and economics. The originality lies in the application of various analysis methods through the Bibliometrix and R-Project software to map and analyze the scientific production in this area, providing a better understanding of the evolution and current state of the research. This work contributes to the literature by providing a detailed overview of research trends, main contributions, and gaps in knowledge.

**Keywords:** Bibliometric Analysis, Econophysics, Economics, Statistical Physics, Scientific Production, Literary Production

## ECONOPHYSICS, ESTADO DA CIÊNCIA E PRODUÇÃO BIBLIOGRÁFICA: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

### RESUMO

**Objetivo:** Este estudo tem como objetivo investigar o estado da arte no que diz respeito à produção científica da Econofísica como área de estudos. Com o intuito de mapear a produção anual de artigos, tipos de documentos, autores mais relevantes; países, instituições e revistas mais produtivos; rede de colaboração científica; além dos temas associados e tendências.

**Referencial Teórico:** A Econofísica aplica os procedimentos da física para analisar os mercados financeiros e para resolver os problemas da economia, utilizando ferramentas como a teoria fractal e o movimento browniano. O termo Econofísica foi criado por H. Eugene Stanley em 1995. O mapeamento bibliométrico, realizado com softwares como Bibliometrix e R-Project, é essencial para entender as tendências na literatura académica sobre a Econofísica.

**Método:** Este estudo utiliza a abordagem bibliométrica para mapear a literatura sobre a Econofísica. Ela é definida como um método que utiliza de recursos da matemática, estatística e computação para trazer a memória científica de uma área do conhecimento A base de dados da Scopus foi utilizada para recolher os dados sobre as principais publicações durante o período de 1996 a 202. Utilizando os softwares Bibliometrix e R-Project, foram produzidos os mapas de coocorrência de palavras-chave, a análise de citações e as redes de colaboração entre autores e instituições. As principais métricas analisadas incluem o número de publicações por ano, as principais áreas temáticas, as fontes de publicações, os autores mais citados, e a distribuição geográfica das contribuições científicas.

**Resultados e Discussão:** 1.805 publicações no total entre os anos de 1996 e 2024 (junho), entre as quais 1.450 são artigos científicos relacionados com a Econofísica. Os dados sugerem um aumento consistente nas publicações de artigos até 2006, após o qual houve uma estabilidade entre os 80 a 100 artigos publicados anualmente. A percentagem de colaboração internacional situa-se nos 20,83% que evidencia a vertente colaborativa entre os diversos países. O número médio de citações dos artigos está nos 22,41%. Analisando a coocorrência de palavras-chave foram identificados os três principais grupos temáticos —finanças, física e economia—, os termos mais frequentemente utilizados são comércio e mercados financeiros. 793 artigos foram publicados pela revista Physica A que lidera o ranking das publicações. Os escritores mais produtivos e altamente referenciados são o Zhou, o Stanley e o Mantegna. E as nações que mais contribuem para o dsenvolvimento da Econofísica são a China, os Estados Unidos da América e o Japão.

**Implicações da Pesquisa:** Este estudo fornece uma visão mais abrangente da evolução da Econofísica, promovendo as principais tendências e às áreas de investigação que têm emergido nas últimas décadas. Contribui para uma melhor compreensão de como os procedimentos da física podem ser utilizados para resolver os problemas da economia, promovendo uma economia mais equitativa e sustentável. Além disso, ao identificar as principais redes de colaboração e os autores mais influentes, este trabalho pode guiar os novos investigadores na identificação de potenciais parceiros e fontes de conhecimento.

**Originalidade/Valor:** Este estudo é pioneiro ao realizar uma análise bibliométrica abrangente da literatura sobre a Econofísica, um campo relativamente novo que combina a ciência física e a economia. A originalidade reside na aplicação de métodos bibliométricos, através dos softwares Bibliometrix e R-Project, para mapear e analisar a produção científica nesta área, fornecendo uma melhor compreensão sobre a evolução e o estado atual da investigação. Este trabalho contribui para a literatura ao oferecer uma visão detalhada das tendências de pesquisa, principais contribuições e lacunas no conhecimento, o que pode orientar futuras investigações e colaborações.

**Palavras-chave:** Análise Bibliométrica, Econofísica, Economia, Física Estatística, Produção Cientifica, Produção Literária

## ECONOFÍSICA, ESTADO DE LA CIENCIA Y PRODUCCIÓN BIBLIOGRÁFICA: UN ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO

### RESUMEN

**Objetivo**: Este estudio tiene como objetivo investigar el estado del arte en relación a la producción científica de la Econofísica como campo de estudio. Con el objetivo de mapear la producción anual de artículos, tipos de documentos, autores más relevantes; países, instituciones y revistas más productivas; red de colaboración científica; así como temas y tendencias asociadas.

**Marco teórico**: La econofísica aplica procedimientos de la física para analizar los mercados financieros y resolver problemas económicos, utilizando herramientas como la teoría fractal y el movimiento browniano. El término Ecofísica fue acuñado por H. Eugene Stanley en 1995. La cartografía bibliométrica, realizada con programas como Bibliometrix y R-Project, es esencial para comprender las tendencias de la literatura académica sobre Ecofísica.

**Método**: Este estudio utiliza el enfoque bibliométrico para mapear la literatura sobre Econofísica. Se define como un método que utiliza recursos matemáticos, estadísticos y computacionales para recuperar la memoria científica de un área de conocimiento. Se utilizó la base de datos Scopus para recopilar datos sobre las principales publicaciones desde 1996 hasta 202. Se utilizaron los programas informáticos Bibliometrix y R-Project para elaborar mapas de co-ocurrencia de palabras clave, análisis de citas y redes de colaboración entre autores e instituciones. Las principales métricas analizadas incluyen el número de publicaciones por año, las principales áreas temáticas, las fuentes de las publicaciones, los autores más citados y la distribución geográfica de las contribuciones científicas.

**Resultados y Discusión:** 1.805 publicaciones en total entre 1996 y 2024 (junio), de las cuales 1.450 son artículos científicos relacionados con la Econofísica. Los datos sugieren un aumento constante en la publicación de artículos hasta 2006, año a partir del cual se produjo una estabilidad entre 80 y 100 artículos publicados anualmente. El porcentaje de colaboración internacional se sitúa en el 20,83%, lo que muestra el aspecto colaborativo entre diferentes países. La media de citas de artículos es del 22,41%. Analizando la co-ocurrencia de palabras clave, se identificaron los tres principales grupos temáticos -finanzas, física y economía-, siendo los términos más utilizados los de comercio y mercados financieros. La revista Physica A, que encabeza la clasificación de publicaciones, publicó 793 artículos. Los autores más productivos y con más referencias son Zhou, Stanley y Mantegna. Y las naciones que más contribuyen al desarrollo de la Econofísica son China, Estados Unidos y Japón.

**Implicaciones para la investigación**: Este estudio proporciona una visión más completa de la evolución de la Ecofísica, promoviendo las principales tendencias y áreas de investigación que han surgido en las últimas décadas. Contribuye a una mejor comprensión de cómo los procedimientos de la física pueden utilizarse para resolver problemas económicos, promoviendo una economía más equitativa y sostenible. Además, al identificar las principales redes de colaboración y los autores más influyentes, este trabajo puede orientar a los nuevos investigadores en la identificación de posibles socios y fuentes de conocimiento.

**Originalidad/Valor**: Este estudio es pionero en la realización de un análisis bibliométrico exhaustivo de la literatura sobre Econofísica, un campo relativamente nuevo que combina las ciencias físicas y la economía. La originalidad radica en la aplicación de métodos bibliométricos, utilizando el software Bibliometrix y R-Project, para mapear y analizar la producción científica en esta área, proporcionando una mejor comprensión de la evolución y el estado actual de la investigación. Este trabajo contribuye a la literatura proporcionando una visión detallada de las tendencias de la investigación, las principales contribuciones y las lagunas en el conocimiento, lo que puede orientar futuras investigaciones y colaboraciones.

**Palabras clave**: Análisis Bibliométrico, Ecofísica, Economía, Física Estadística, Producción Científica, Producción Literaria



## 1 INTRODUCTION

This article presents an overview of the state of the art of Econophysics from 1996 to June 2024. Econophysics uses statistical physics techniques to understand economic events such as financial bubbles (for example, the dot-com bubble in 2000 and the housing bubble in 2008), crises caused by asymmetric shocks (such as the one triggered by the coronavirus pandemic in 2019), and systemic risk analyses. This integration of econometric techniques from physics and economics enables the creation of more robust analytical models.

Harry Eugene Stanley was the first to use the term "Econophysics" in 1995 during a presentation at a statistical physics conference on the dynamics of complex systems. He defines this term as an emerging multidisciplinary subject in which physicists analyze economic and financial challenges. (Chakraborti et al., 2022).

Before Stanley's contributions, the use of physical models in economic studies had already been explored. Osborne was a pioneering figure in the introduction of the log-normal model for stock pricing and in the independent application of Brownian motion to the percentage variations in stock prices. His work laid the foundations for economic analysis based on physics (Osborne, 1959).

Peters (1994) ) tested the fractal theory applied to the stock market, developing an approach capable of explaining market deviations based on Gaussian statistics, ensuring the fractal nature of markets through the Hurst exponent. Ten years later, Mandelbrot and Hudson (2004) continued this research, and their results demonstrate that fractal structures can be identified in the evolution charts of stock prices.

More recently, economic studies conducted using physical statistics(Raberto et al., 2002; Cheah and Fry, 2015; Fry and Cheah, 2016; Zebende et al., 2022; Santana, Horta, Revez, et al., 2023) have facilitated a more comprehensive understanding of economic and financial issues related to capital markets.

Besides the contributions to economic analysis, the study of Econophysics provides a more accurate view of the sustainability of our planet, where the aim is to balance the economic growth of countries with environmental preservation and social equity.

The role of Econophysics in introducing new and more effective statistical tools applied to economic and financial phenomena is evident. Given the complexity of the interactions between economics and physics, bibliometric review emerges as an essential tool for mapping and better understanding academic trends in this field. It enables the expansion of the vision and scope of physics study beyond the natural phenomena it is normally associated with.

With the advent of software, applications, and the Internet, bibliometric analysis has proven to be an effective and dynamic method for mapping and analyzing scientific literature across various fields (M. M. M. de Santana et al., 2021) This method provides a more comprehensive and multifaceted perspective on the evolution of Econophysics, identifying trends, domains, and fundamental subareas in the existing literature, as well as the interdisciplinary collaboration of several researchers and the most influential countries (Chen, 2017; M. M. M. de Santana et al., 2021). In this sense, several bibliometric analyses have been identified in the fields of economics and finance (D. Zhang et al., 2019; M. M. M. de Santana et al., 2021; L. Zhang et al., 2022; T. P. Santana, Horta, Ramos, et al., 2023) and Econophysics (Fan et al., 2004; Li et al., 2007a).

However, the authors identify a lack of comprehensive and detailed reviews that seek to integrate the various subfields of Econophysics study in the scientific literature. This article seeks to fill this gap, offering a more comprehensive and structured view of the contributions of researchers to the development of this science and how it responded to significant events since the studies conducted by Fan et al. (2004) and Li et al. (2007b), such as the 2008 financial crisis, the sovereign debt crisis in 2011, or the emergence of cryptocurrencies. The use of new publication tracking methods supported by advanced software enables a broader view of what is being produced in the academic literature, including details that were not possible with existing tools until now.

It is, therefore, intended to answer the following questions about the state of the art in Econophysics: How have publications evolved over the years? What are the main areas and sub-areas associated with the study of Econophysics, and what is their state of relevance and development? What are the main journals and authors that contribute scientifically to the study of Econophysics? How is scientific production distributed among different countries? How is international collaboration structured between countries and between authors?

It is expected that this study can significantly contribute to strengthening this research field.

## 2 THEORETICAL FRAMEWORK

Econophysics is a field that applies the methods and concepts of physics to solve the economic problems of modern societies, such as the financial markets. Although the term Econophysics emerged in 1995, it is acknowledged that some studies in the field predate this date. The pioneering work of Osborne (1959) introduced the log-normal model of stock pricing and applied Brownian motion to the percentage variations in stock prices. Later, the fractal theory became popularized by B. B. Mandelbrot (1983), suggests that this theory can be applied not only to the life sciences, such as the description of complex forms in nature (galaxies and whirlwinds) but also to mathematical and economic aspects, such as price variation in the economy and the application of laws of word frequency, admitting these phenomena can be explained by fractal principles, including self-similarity and scale invariance. Peters (1994) applied fractal theory to financial markets; the results revealed various fractal structures in the variations of stock prices. In the investigations of Mantegna & Stanley (1995), two of the most renowned researchers in the field of Econophysics, it is possible to observe scale behaviour in financial markets, while Sornette et al. (1996) and Feigenbaum & Freund (1996) analyzed the most critical behaviours in capital markets, suggesting that their collapses can be understood as a critical point with log-periodic corrections. This subject was once again the focus of analysis by Sornette and Johansen (1997), who argued that major collapses are analogous to critical points studied in statistical physics. The studies by M. H. R. Stanley et al. (1996) and Amaral et al. (1997) demonstrate that the distribution of company growth rates follows a power law; these results thus suggest that the scale properties previously observed in financial markets can also be applied to the dynamics of business growth.

The study by Vandewalle and Ausloos (1997) used fluctuation analysis (Detrend Fluctuation Analysis - DFA) to investigate long-range correlations in financial data. Recently, Raberto et al. (2002) studied how returns and prices are considered random variables, how these properties are used in the theoretical predictions based on random walk model, and the statistical properties of stock prices. The studies of B. Mandelbrot and Hudson (2004 demonstrate that fractal structures can be identified in stock price evolution charts.

Cheah & Fry (2015) investigate the application of traditional physics statistical tools to analyze speculation in cryptocurrency markets, while Zebende et al. (2022) analyzed the

efficiency of financial markets during the COVID-19 pandemic using DFA and DCCA methods. The results of these studies are proof of the importance of Econophysics in the analysis of different fields of economics, such as the analysis of modern financial markets. It is also essential that researchers of Econophysics engage in communication and scientific collaboration in order to help develop this field into an effective science in economic research.

Therefore, Fan et al. (2004) studied the evolution of Econophysics through the creation of scientific communication networks, building a thoughtful and directed network that included collaboration and citation. In the same direction, Li et al. (2007) collected a set of articles on the subject. They built a scientific communication network to integrate the exchange of ideas between researchers in the field of Econophysics, through collaboration, citation and personal discussion. Inspired by the concept of scientific collaboration networks, they proposed an evolutionary model for thoughtful networks.

In this context, bibliometric analysis is a highly relevant analytical methodology in the academic field. It is carried out through the statistical analysis of a large set of data, to identify emerging trends, key research components and patterns of collaboration in a specific field (Alan Pritchard, 1969; Ding et al., 2001; Donthu et al., 2021). This provides a clearer understanding of the dynamics of scientific production (de Oliveira Dias & de Miranda Rocha, 2024).

## 3 METHODOLOGY

This research uses bibliometric analysis to study the scientific production of Econophysics. Bibliometrics is a science that identifies the state of development of an area of knowledge through literary production based on qualitative and quantitative analysis (Galindo-Rueda & López-Bassols, 2022; T. P. Santana, Horta, Chambino, et al., 2023).

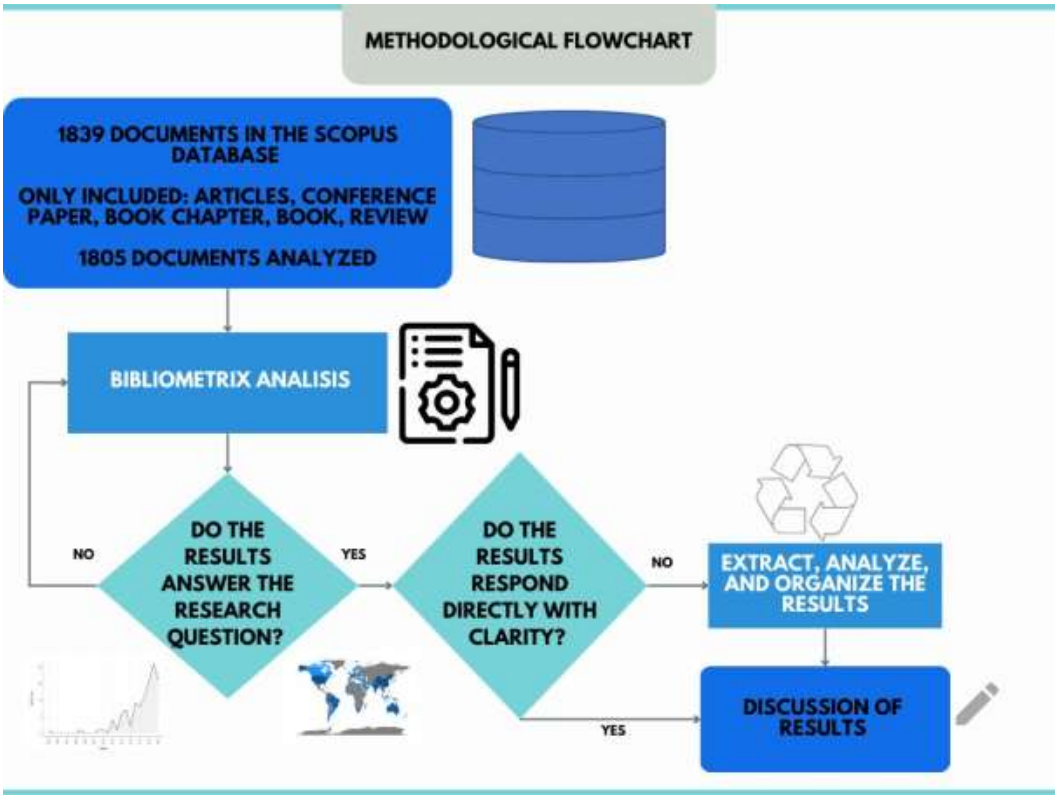
The SCOPUS database was used to select all the documents based on the composition: Econophysics OR Econophysics OR Econophysical. The SCOPUS database was used because it is the largest multidisciplinary database for indexing scientific documents.

1839 documents were identified with the search words in the title, abstract or keywords. Editorials, notes and corrections were excluded as they were not directly research texts, reaching 1805 documents from 1996 to 2024, in any language and nationality.

Figure 1 shows the methodological flowchart and the initial stages of the research in the first bubble, namely the identification and selection of documents.

**Figure 1**

*Methodological flowchart.*




The Bibiometrix/R-Project (Aria and Cuccurullo, 2017a) was used to develop the bibliometric analysis. Bibliometrix is a package of R-Project, which is free software with numerous functionalities, is open source, is multiplatform, is widespread throughout the world, and has a large scientific community. We can identify numerous bibliometric studies using Bibiometrix/R-Project (Domingues et al., 2018; Harada et al., 2000; T. P. Santana, Horta, Chambino, et al., 2023).

## 4 RESULTS AND DISCUSSIONS

The analysis of the results achieved in this study offers a broader view of the state of the art in Econophysics, highlighting scientific gaps and the need for future research. To this end, a bibliometric analysis was used to map global scientific production, identify collaboration networks, and understand the distribution among the main institutions.

Table 1 identifies the total number of publications between 1996 and 2024 (June), totalling 1,805 items. Of these, 1,450 are research articles, and the conference proceedings and book chapters are less representative.

**Table 1**

*Main information about the data.*

| Description | Results |
|---|---|
| MAIN INFORMATION ABOUT DATA | |
| Timespan | 1996:2024 |
| Sources (Journals, Books, etc) | 398 |
| Documents | 1805 |
| Annual Growth Rate % | 9,88 |
| Document Average Age | 11,8 |
| Average citations per doc | 22,41 |
| References | 56961 |
| DOCUMENT CONTENTS | |
| Keywords Plus (ID) | 4778 |
| Author's Keywords (DE) | 3381 |
| AUTHORS | |
| Authors | 2446 |
| Authors of single-authored docs | 295 |
| AUTHORS COLLABORATION | |
| Single-authored docs | 435 |
| Co-Authors per Doc | 2,59 |
| International co-authorships % | 20,83 |
| DOCUMENT TYPES | |
| article | 1450 |
| book | 24 |
| book chapter | 63 |
| conference paper | 212 |
| review | 56 |

Data analysis reveals the evolution and influence of scientific production in the field of Econophysics. Of the 1,805 documents identified, 1,450 are scientific articles, which illustrates the primacy of this format as the main form of dissemination. The dominance of scientific articles over other formats reveals the central role of these publications in this field and in developing new methods for analyzing economic studies.

International collaboration stands at 20.83%, highlighting the global dimension of research and the relationship between researchers from different countries, resulting in an exchange of ideas that is essential for the development of new models and analytical tools that allow a better understanding of economic events (Verspagen & Werker, 2004). This internationalization of research is considered relevant in order to expand scientific perspectives. The published documents have an average age of 11.8 years and an average of 22.41 citations

per article, showing a lasting and substantial impact on the literature and influencing research in physics and economics. (Sternberg & Gordeeva, 1996).

This number of citations illustrates the significant impact. In addition, the 4778 associated keywords (Keywords Plus) and the 3381 keywords provided by the authors (Author's Keywords) demonstrate a remarkable diversification of topics. This multitude of terminologies reflects the broader scope of the different investigations (Shafique, 2013).

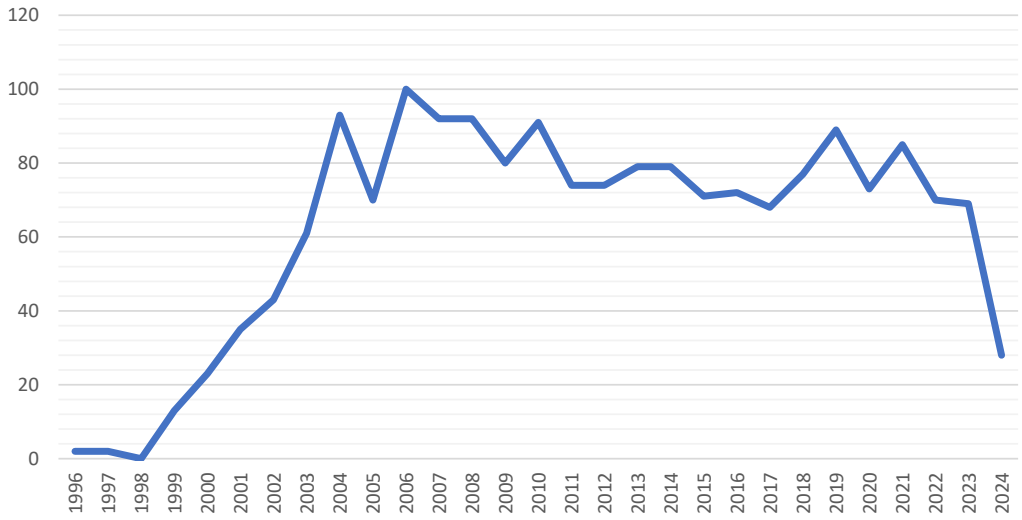
However, it is important to note that the true extent of scientific production associated with this area may be underestimated. Many articles that conceptually belong to the field of Econophysics do not explicitly use the term "Econophysics". This is because these studies focus their attention on economic issues and specific financial questions, where physics methodologies and concepts are addressed, but which, given the specificity of their context, the authors do not directly categorize under the label "Econophysics". This suggests that the studies carried out may be broader than the numbers indicate (Pesta et al., 2018).

## 4.1 HOW HAVE PUBLICATIONS EVOLVED OVER THE YEARS?

Figure 2 shows an analysis of the evolution of production. In the initial phase, between 1996 and 2000, the number of publications gradually increased, reflecting the recent nature of Econophysics (H. E. Stanley et al., 1999a). From 2001, there was an increase in the pace of scientific production, reaching a peak in 2006 with more than 100 articles being published. This can be associated with its recognition as a relevant field for understanding economic analysis. After this high point, the graph shows a slight slowdown, which stabilized at between 80 and 100 publications per year between the years 2007 and 2021. This reflects a maturity period during which this science establishes itself. The apparent decline seen in the final section, which refers to June 2024, is a consequence of the time frame of the available data. Including publications from the second half of 2024 is estimated to bring the total number of articles this year into line with the production levels seen in previous years.

**Figure 2**

*Publication by year.*




The trajectory has a pattern of growth followed by a period of stabilization, which is typical in scientific areas that move from an exploratory phase to one of consolidation (Chakraborti et al., 2022). Stabilization suggests that Econophysics has reached a maturity stage, where the main physical methods and models used in this science have been widely accepted and are consistently applied in economics (H. E. Stanley et al., 1999a). However, it also suggests the need for a renewal in approach by researchers to avoid long-term stagnation.

As an interdisciplinary subject of study, researchers should seek to innovate research focusing on new economic issues and a desire to broaden their scope beyond the traditional boundaries of Econophysics in order to create a link between these and current physical models (Chakraborti et al., 2022).

It is also of the utmost importance to ensure that it continues to make a substantial contribution to the understanding of economic principles and to maintain the status of this science as a relevant field of research. It is, therefore, essential to foster innovation and the ability of researchers and academics to adapt to the evolution of the economic horizon, ensuring an effective response to the events it generates.

## 4.2 WHAT ARE THE MAIN AREAS AND SUB-AREAS ASSOCIATED WITH THE STUDY OF ECONOPHYSICS, AND WHAT IS THEIR STATE OF RELEVANCE AND DEVELOPMENT?

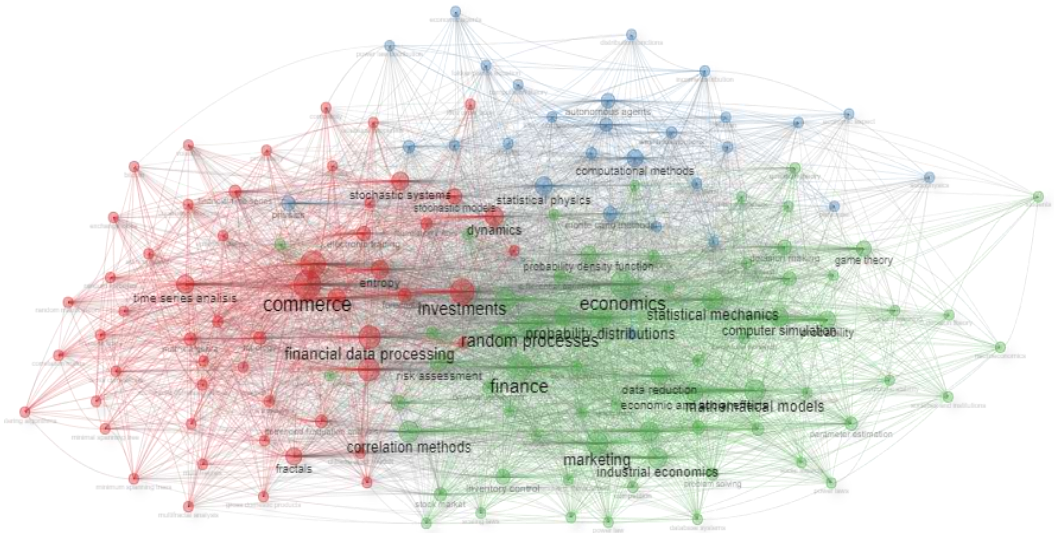
A keyword co-occurrence analysis was used to identify the main areas and sub-areas associated with research and find the words most frequently used in academic articles. This analysis provides a better understanding of the issues that have generated the most interest. The Bibliometrix algorithm creates a map with the distance between the phrases, translating the association between the various Keywords (Aria & Cuccurullo, 2017b). According to Moral-Muñoz et al. (2020), the closest terms on a map indicate a stronger link. Figure 3 depicts the map of the keyword co-occurrence network, which reflects the large number of related keywords represented on this map by lines indicating which articles these keywords appear in together. The most used phrases signify the most widely researched areas.

The co-occurrence map (Figure 3) distinguishes three large groups: finance (red), physics (blue) and economics (green). In the finance group, “Commerce” is the most widely used term, reflecting the evolution of this field in relation to financial markets. The economics group highlights the relationship between economics and trading, specifically how physical algorithms analyze financial behaviour over time (H. E. Stanley et al., 1999b). The physics group investigates classical physics. In general, we found that the most frequently associated words in the finance group are Trading (325), Time Series Analysis (112), Financial Data Processing (95), Investments (92), Correlation Methods (92), Stochastic Systems (69) and Dynamics (62). The economics group demonstrates how financial and economic systems can be approached as complex systems (H. E. Stanley et al., 1999b). This group makes the connection between Economics (178) and Investments (92), Random Processes (125) and Finance (184).

In general, the links emphasize a focus on complex systems related to financial markets rather than more traditional complex systems. The physics group is a peripheral core studying classical physics.

**Figure 3**

*Network analysis*

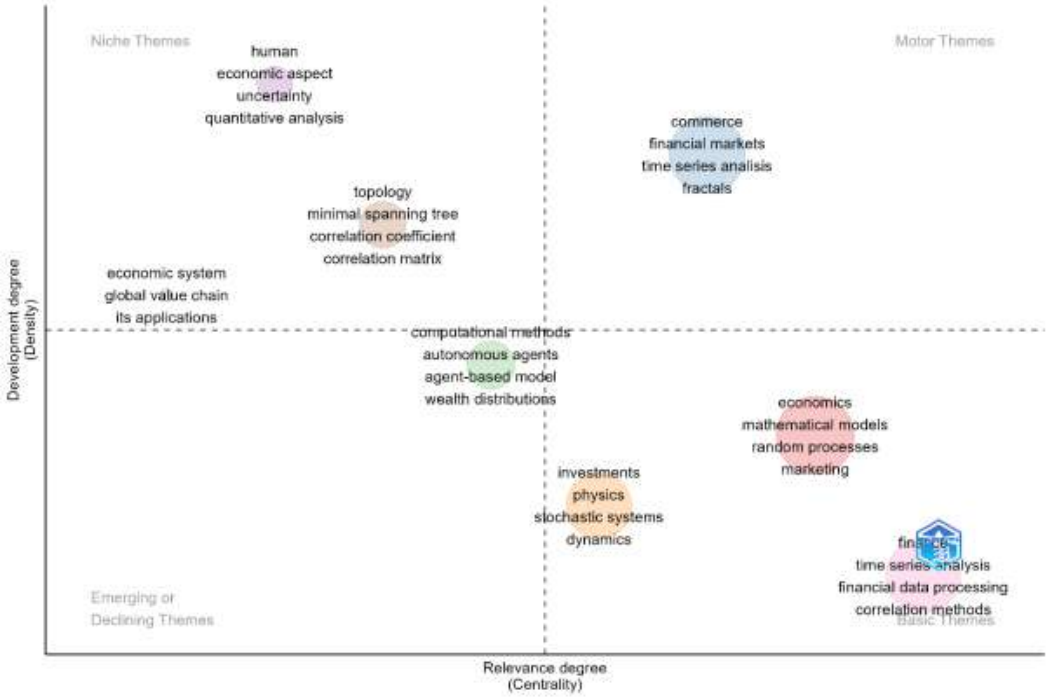



The chart in Figure 4 categorizes research topics based on two axes: the degree of development (density) and relevance (centrality). This type of visualization allows us to determine the position of topics in terms of their evolution and importance in the scientific literature (Garcia-Buendia et al., 2021). Human Aspect, Economics, Uncertainty and Quantitative Analysis are the topics that are considered to be well developed, which reflects a significant depth, but they are also less relevant in general. Trade, Financial Markets, Time Series Analysis and Fractals are the most important and dynamic themes, with a strong level of development and relevance, that drive the study of Econophysics. The Economic System, the Global Value Chain and their various applications are concepts that have not yet gained relevance in the field or are losing importance. Financial Data Processing, Correlation Methods, Finance and Time Series Analysis are the foundations of this field of study. They are considered vital but still require some development. Trade, Financial Markets, Time Series Analysis and Fractals are the drivers of research and have a high impact on it. They are constantly evolving and contribute significantly to the advancement of this field. Computational Methods, Autonomous Agents and Agent-Based Models are relevant and show an expanding trend with the potential to become more developed. Wealth Distribution is an emerging and increasingly relevant subject. Topology, Minimum Generating Tree, Correlation Coefficient and Correlation Matrix are well developed in certain groups but generally have less impact. The Economic

System and the Global Value Chain are less developed and centralized topics, suggesting these themes have not yet been thoroughly studied.

**Figure 4**

*Thematic word map.*




## 4.3 WHICH ARE THE MAIN JOURNALS AND AUTHORS THAT CONTRIBUTE SCIENTIFICALLY TO THE STUDY OF ECONOPHYSICS?

Table 2 lists the top 15 journals. The scientific journal Physica A: Statistical Mechanics and its Applications published 793 articles, followed by the International Journal of Modern Physics C, which published 59 articles. These figures show that the field of Econophysics is of interest to both economists and physicists, justifying its presence in numerous high-quality journals, many of which have been designated as Q1 or Q2 in the Scimago Journal & Country Rank. These top 15 journals published 1116 articles, which represents 61.83% of all publications.

**Table 2**

*Main Publications.*

| Sources | Articles |
|---|---|
| PHYSICA A: STATISTICAL MECHANICS AND ITS APPLICATIONS | 793 |
| INTERNATIONAL JOURNAL OF MODERN PHYSICS C | 59 |
| ENTROPY | 46 |
| JOURNAL OF THE KOREAN PHYSICAL SOCIETY | 32 |
| QUANTITATIVE FINANCE | 31 |
| ECONOPHYSICS AND SOCIOPHYSICS: TRENDS AND PERSPECTIVES | 21 |
| EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL B | 21 |
| EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL: SPECIAL TOPICS | 16 |
| FRONTIERS IN PHYSICS | 16 |
| CHAOS, SOLITONS AND FRACTALS | 15 |
| INTERNATIONAL JOURNAL OF MODERN PHYSICS B | 15 |
| INTERNATIONAL REVIEW OF FINANCIAL ANALYSIS | 13 |
| NEW ECONOMIC WINDOWS | 13 |
| PHYSICAL REVIEW E - STATISTICAL, NONLINEAR, AND SOFT MATTER PHYSICS | 13 |
| AIP CONFERENCE PROCEEDINGS | 12 |

When it comes to the most productive authors, the productivity and impact of their works are fundamental for a more consistent study. Table 3 combines all the indicators to give an overview of the 15 most productive authors since 1996. Productivity was determined by the number of articles published by an author over the period under analysis. In contrast, the number of citations per year was used to evaluate the impact. The most productive authors are Zhou, Stanley, Mantegna and Ausloos.

In addition, it can be shown that Mantegna R. N. is a prolific author who published extensively on this subject between the years 1996 and 2019. The most cited writers in the dataset are Zhou, W.-X (2579 citations), Stanley, M. H. R. (2382 citations) and Scalas, E. (2022 citations). Interestingly, these three authors are the only ones with more than 2000 citations in the data.

So, in addition to established researchers such as Stanley and Mantegna, Zhou and Sornette, who began publishing in 2003, can be considered among the most influential authors and are therefore also worthy of mention.

**Table 3**

*Most productive authors.*

| Author | TC | NP | PY_start |
|---|---|---|---|
| ZHOU W-X | 2579 | 78 | 2003 |
| STANLEY HE | 2382 | 34 | 1996 |
| SORNETTE D | 1405 | 24 | 2003 |
| AUSLOOS M | 723 | 27 | 1997 |
| MANTEGNA RN | 1329 | 23 | 1996 |
| SCHINCKUS C | 413 | 27 | 2009 |
| GOPIKRISHNAN P | 808 | 14 | 1999 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| JIANG Z-Q | 809 | 17 | 2007 |
| DI MATTEO T | 746 | 16 | 2004 |
| PLEROU V | 734 | 13 | 2000 |
| TAKAYASU H | 391 | 21 | 2001 |
| CHEN W | 335 | 18 | 2008 |
| LILLO F | 953 | 14 | 2000 |
| SCALAS E | 2022 | 15 | 1999 |
| TAKAHASHI T | 430 | 18 | 2006 |

Table 4 shows the ten authors who have published the most documents indexed in econophysics. It is considered that published scientific research lacks consistency in terms of topics and timelines, which influences the current progression of research and its evolution.

**Table 4**

*Articles by author.*

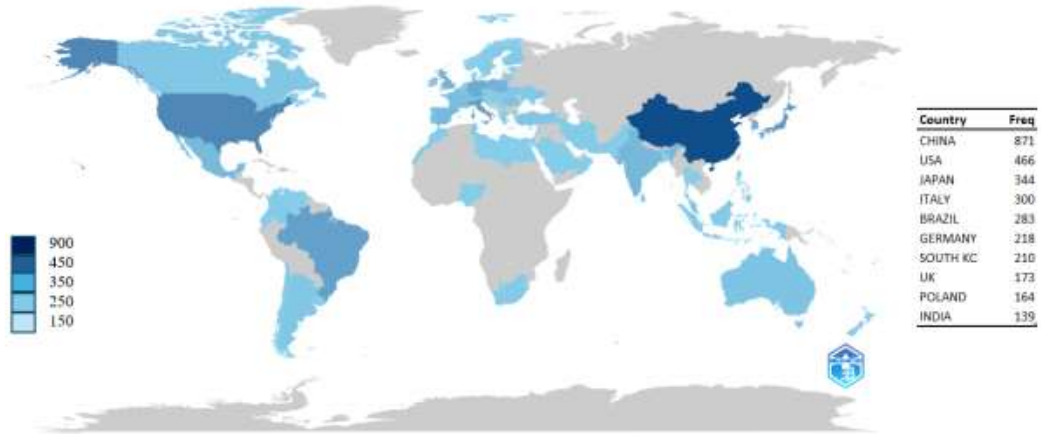
| Authors | Articles |
|---|---|
| ZHOU W-X | 78 |
| STANLEY HE | 34 |
| AUSLOOS M | 27 |
| SCHINCKUS C | 27 |
| SORNETTE D | 24 |
| MANTEGNA RN | 23 |
| LI J-C | 22 |
| TAKAYASU H | 21 |
| CHEN W | 18 |
| TAKAHASHI T | 18 |

## 4.4 HOW SCIENTIFIC PRODUCTION IS DISTRIBUTED AMONG THE DIFFERENT COUNTRIES

Figure 5 shows the 10 countries with the highest number of published works. A bibliometric analysis of this map reveals its global reach. The concentration of scientific production in nations with greater economic power suggests a strong relationship between Econophysics and the major global innovation centres (Docampo & Bessoule, 2019).

**Figure 5**

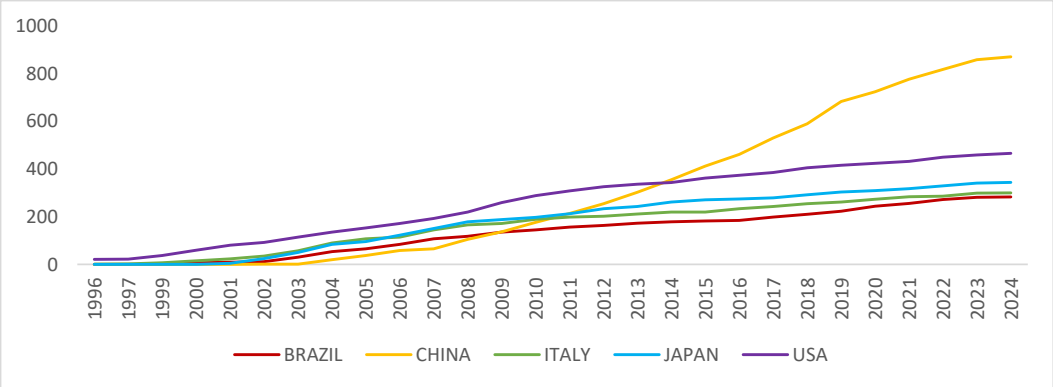
*Most productive countries.*




The People's Republic of China (871), the United States (466), and Japan (344) are the main contributors to this field of study (Figure 5). China's quick rise as a world economic power and major contributor is evident, with the United States following close behind with 466 articles. Countries such as Japan, Italy and Brazil have also made significant contributions. Brazil's 283 publications maintain its high status in scientific research in this field in Latin America.

**Figure 6**

*Country production over time.*




An analysis of scientific production in the main countries shows significant growth in China since 2008, even overtaking the United States in 2014. Furthermore, although the growth

of the other countries (Brazil, Italy, Japan and the United States) is more gradual but relatively linear over time. It should be noted that these five countries belong to the group of the largest global economies, either in the G7 or the G5, suggesting a significant correlation between economic development and advances in scientific production in this field. This could mean that richer countries have a greater capacity to invest in research and the development of new methods of economic analysis, contributing to the growth of the Econophysic field (Docampo & Bessoule, 2019).

## 4.5 HOW IS INTERNATIONAL COLLABORATION STRUCTURED BETWEEN COUNTRIES AND BETWEEN AUTHORS?

Figure 7 shows a network of collaboration between the various countries. China, Japan, Germany, and the United States, which appear to be the most productive countries in international collaborations, form numerous connections, indicating their collaborations are intensive.

**Figure 7**

*Collaboration by country.*


The group, which is made up of Poland, Belgium, and Ukraine, denotes a specific research network that works together on topics of common interest. The most influential countries are China, Japan and Germany, which not only interact with each other, but also act as intermediaries between the other nations, providing an extensive research network.

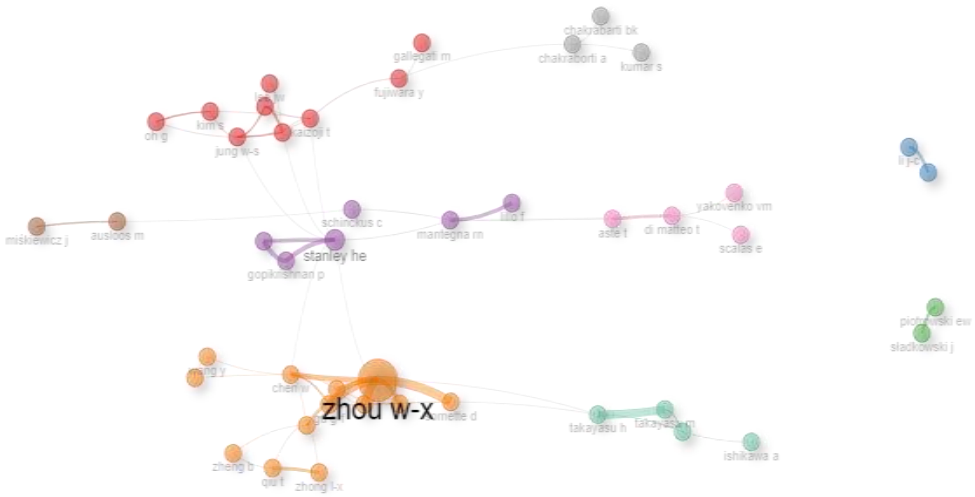
In addition to global cooperation, there are regional or thematic research networks. These include, for instance, collaborations between Iran and Lithuania or Finland, which may reflect cultural affinities, physical proximity or shared academic interests.

The intensity of the lines linking the core countries and countries such as Malaysia, Brazil and Poland indicates a flow of knowledge. In another sense, Brazil, Poland, Ukraine, Finland, India and Hungary are emerging as new research centres. The countries' collaboration networks show that China, Japan, Germany and the United States play key roles in promoting numerous international collaborations. The remaining countries have regionalized or specialized collaboration networks, highlighting the diversity and extent of Econophysics in scientific progress.

The co-authorship network (Figure 8) comes from statistics, computer science, and the science of collaboration networks and is an important tool in the study of bibliometric analysis. This technique is used to relate groups of similar publications, authors, or journals, allowing the analysis of scientific collaboration patterns and identifying developing subdomains (van Eck & Waltman, 2010). This structure enables an understanding of the connections between different lines of research and the visualization of networks of knowledge creation and dissemination, where each node represents an author, and the lines between the nodes represent collaborations in publications.

**Figure 8**

*Collaboration network (authors).*



The orange group includes the author Zhou W-X, who stands out for his centrality in the network, suggesting that he plays an important role in disseminating and collaborating on several articles. Other authors, such as Meng Y and Zhong I-X, are also present, highlighting a strong co-authorship network among them.

The purple group, where Stanley He and Mantegna R.N. are located, shows a high diversity of collaborations across different geographical and institutional boundaries. The deep connections between these nodes result in more frequent and possibly more productive interactions.

In the pink group, authors such as Di Matteo T and Yakovlenko V.M. demonstrate interesting collaborations with other researchers, reinforcing the idea that this group is active in discussions and investigations across different areas.

The results show that collaboration networks are more cohesive within the same geographical region, as illustrated by the example in the orange group, since it includes many Asian authors, mostly from China. However, the authors of the purple group, such as Stanley HE and Mantegna RN, demonstrate a global collaboration network that encompasses many other groups. Thus, they are considered a linking vehicle between various research communities and promote the flow of ideas and methodologies among different institutions and continents.

## 5 CONCLUSION

This study analyzed the global trends in the research of Econophysic field between the years 1996 and June 2024. Econophysics has shown significant growth over the past two decades, and the number of publications has increased markedly since 2006, showing a growing interest in applying classical physics methods, such as statistical mechanics and complex systems, to solve current economic and financial challenges. Based on the analysis of the keyword co-occurrence network chart, the main identified themes include: (a) Time series analysis, (b) Financial markets, (c) Statistical models applied to economics, and (d) Statistical mechanics.

In the analysis of “keyword bursts,” it was revealed that the focus of studies has evolved over time, with the emergence of new lines of research related to the complexity of the modern economy. The keywords that stood out the most denote the fact that the econophysic field is increasing as an independent research, bearing out the idea that there is a transition from traditional physical methods to their applications in the economy.

The co-authorship analysis reveals that less than 20.83% of the authors have published more than once on Econophysics, making it reasonable to infer that many researchers are still in the early stages of their work. Regarding collaboration networks, the most productive and cited authors are Zhou, Stanley, and Mantegna, who stand out and play a crucial role in shaping and advancing this field. These authors are recognized for their number of publications and their influence on the academic community.

International cooperation highlights that China and the United States lead scientific research. These nations prevail in both co-authorship networks and global scientific production. Nevertheless, China adopts a more collaborative approach, establishing itself as one of the main research hubs. This analysis also suggests that most articles are produced independently with limited collaboration, and there is a marked disparity in scientific output, with the main publications coming from developed economies such as China, the United States, Japan, Germany, and the United Kingdom. These countries lead both scientific production and the co-authorship network, reflecting the significant financial support available to their research institutions. Specialized journals in traditional physics and statistical mechanics, such as "Physica A: Statistical Mechanics and its Applications" and "Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment," lead in the publication of articles.

This represented a first step in revealing how bibliometric analysis can be useful in outlining future directions of research in Econophysics.

## REFERENCES

Alan Pritchard. (1969). Statistical Bibliography or Bibliometrics? In *Journal of Documentation* (Vol. 25, Issue 4).

Amaral, L. A. N., Buldyrev, S. V., Havlin, S., Leschhorn, H., Maass, P., Salinger, M. A., Stanley, H. E., & Stanley, M. H. R. (1997). Scaling behavior in economics: I Epirical results for company growth. *Journal de Physique II*, *7*(4). https://doi.org/10.1051/jp1:1997180

Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017a). bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, *11*(4), 959–975. https://doi.org/10.1016/J.JOI.2017.08.007

Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017b). bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, *11*(4). https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007

Chakraborti, A., Challet, D., Cheong, S. A., Mizuno, T., Oh, G., & Zhou, W. X. (2022). Editorial: From Physics to Econophysics and Back: Methods and Insights. In *Frontiers in Physics* (Vol. 10). https://doi.org/10.3389/fphy.2022.969516

Cheah, E. T., & Fry, J. (2015). Speculative bubbles in Bitcoin markets? An empirical investigation into the fundamental value of Bitcoin. *Economics Letters*, *130*. https://doi.org/10.1016/j.econlet.2015.02.029

Chen, C. (2017). Science Mapping: A Systematic Review of the Literature. *Journal of Data and Information Science*, *2*(2). https://doi.org/10.1515/jdis-2017-0006

de Oliveira Dias, F., & de Miranda Rocha, G. (2024). TERRITORIAL DEVELOPMENT: A BIBLIOMETRIC ANALYSIS OF SCIENTIFIC PRODUCTION THROUGH RStudio® AND VOSviewer® (2013-2022). *Revista de Gestao Social e Ambiental*, *18*(2). https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n2-045

de Santana, M. M. M., Mariano-Neto, E., de Vasconcelos, R. N., Dodonov, P., & Medeiros, J. M. M. (2021). Mapping the research history, collaborations and trends of remote sensing in fire ecology. *Scientometrics*, *126*(2). https://doi.org/10.1007/s11192-020-03805-x

Ding, Y., Chowdhury, G. G., & Foo, S. (2001). Bibliometric cartography of information retrieval research by using co-word analysis. *Information Processing and Management*, *37*(6). https://doi.org/10.1016/S0306-4573(00)00051-0

Docampo, D., & Bessoule, J. J. (2019). A new approach to the analysis and evaluation of the research output of countries and institutions. *Scientometrics*, *119*(2). https://doi.org/10.1007/s11192-019-03089-w

Domingues, A. M., Bianchini, M. I., & Santos, L. A. C. (2018). *Mapeamento da ciência com o pacote R Bibliometrix: uma aplicação no estudo de empreendedorismo acadêmico*. *9*, 287–294. https://doi.org/10.7198/S2318-3403201800010033

Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, *133*. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070

Fan, Y., Li, M., Chen, J., Gao, L., Di, Z., & Wu, J. (2004). Network of econophysicists: A weighted network to investigate the development of econophysics. *International Journal of Modern Physics B*, *18*(17–19), 2505–2511. https://doi.org/10.1142/s0217979204025579

Feigenbaum, J. A., & Freund, P. G. O. (1996). Discrete scale invariance in stock markets before crashes. *International Journal of Modern Physics B*, *10*(27). https://doi.org/10.1142/S021797929600204X

Fry, J., & Cheah, E. T. (2016). Negative bubbles and shocks in cryptocurrency markets. *International Review of Financial Analysis*, *47*. https://doi.org/10.1016/j.irfa.2016.02.008

Galindo-Rueda, F., & López-Bassols, V. (2022). Implementing the OECD Frascati Manual: Proposed reference items for business R&D surveys. *OECD Science, Technology and Industry Working Papers*. https://doi.org/10.1787/d686818d-en

Garcia-Buendia, N., Moyano-Fuentes, J., Maqueira-Marín, J. M., & Cobo, M. J. (2021). 22 Years of Lean Supply Chain Management: a science mapping-based bibliometric analysis. In *International Journal of Production Research* (Vol. 59, Issue 6). https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1794076

Harada, M. A., Hirata, N., & Trein, C. A. (2000). *Política espacial e de defesa: science mapping da produção científica internacional utilizando o pacote R-Bibliometrix*. https://www.enabed2021.abedef.org/resources/anais/15/enabed2020/1626482824_ARQUIVO_6688eb2d2d76226dc038f700d0142ecf.pdf

Li, M., Wu, J., Fan, Y., & Di, Z. (2007a). Econophysicists collaboration networks: Empirical studies and evolutionary model. *New Economic Windows*, *5*, 173–182. https://doi.org/10.1007/978-88-470-0665-2_13

Li, M., Wu, J., Fan, Y., & Di, Z. (2007b). Econophysicists collaboration networks: Empirical studies and evolutionary model. *New Economic Windows*, *5*. https://doi.org/10.1007/978-88-470-0665-2_13

Mandelbrot, B. B. (1983). Fractals and the geometry of nature. In *American Journal of Physics* (Vol. 51, Issue 3).

Mandelbrot, B., & Hudson, R. L. (2004). The (Mis)behavior of Markets: A Fractal View of Financial Turbulence. In *The Mathematical Intelligencer*.

Mantegna, R. N., & Stanley, H. E. (1995). Scaling behaviour in the dynamics of an economic index. *Nature*, *376*(6535). https://doi.org/10.1038/376046a0

Moral-Muñoz, J. A., Herrera-Viedma, E., Santisteban-Espejo, A., & Cobo, M. J. (2020). Software tools for conducting bibliometric analysis in science: An up-to-date review. In *Profesional de la Informacion* (Vol. 29, Issue 1). https://doi.org/10.3145/epi.2020.ene.03

Osborne, M. F. M. (1959). Brownian Motion in the Stock Market. *Operations Research*, *7*(2). https://doi.org/10.1287/opre.7.2.145

Pesta, B., Fuerst, J., & Kirkegaard, E. O. W. (2018). Bibliometric keyword analysis across seventeen years (2000–2016) of intelligence articles. *Journal of Intelligence*, *6*(4). https://doi.org/10.3390/jintelligence6040046

Peters, Edgar. E. (1994). Fractal market analysis : applying chaos theory to investment and economics. In *Wiley finance editions*.

Raberto, M., Scalas, E., & Mainardi, F. (2002). Waiting-times and returns in high-frequency financial data: An empirical study. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, *314*(1–4). https://doi.org/10.1016/S0378-4371(02)01048-8

Santana, T. P., Horta, N. R., Chambino, M. R., Dias, R. M. T. S., Vasconcelos, R. N., Filho, A. M. da S., & Zebende, G. F. (2023). Interdependence and contagion effects in agricultural commodities markets: A bibliometric analysis, implications, and insights for sustainable development. *Equilibrium. Quarterly Journal of Economics and Economic Policy*, *18*(4), 907–940. https://doi.org/10.24136/eq.2023.029

Santana, T. P., Horta, N. R., Ramos, M. C., Dias, R. M. T. S., Vasconcelos, R. N., da Silva Filho, A. M., & Zebende, G. F. (2023). Interdependence and contagion effects in agricultural commodities markets: A bibliometric analysis, implications, and insights for sustainable development. In *Equilibrium. Quarterly Journal of Economics and Economic Policy* (Vol. 18, Issue 4). https://doi.org/10.24136/eq.2023.029

Santana, T. P., Horta, N., Revez, C., Dias, R. M. T. S., & Zebende, G. F. (2023). Effects of Interdependence and Contagion on Crude Oil and Precious Metals According to ρDCCA: A COVID-19 Case Study. *Sustainability (Switzerland)*, *15*(5). https://doi.org/10.3390/su15053945

Shafique, M. (2013). Thinking inside the box? Intellectual structure of the knowledge base of innovation research (1988-2008). In *Strategic Management Journal* (Vol. 34, Issue 1). https://doi.org/10.1002/smj.2002

Sornette, D., & Johansen, A. (1997). Large financial crashes. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, *245*(3–4). https://doi.org/10.1016/S0378-4371(97)00318-X

Sornette, D., Johansen, A., & Bouchaud, J. P. (1996). Stock market crashes, precursors and replicas. *Journal de Physique I*, *6*(1). https://doi.org/10.1051/jp1:1996135

Stanley, H. E., Amaral, L. A. N., Canning, D., Gopikrishnan, P., Lee, Y., & Liu, Y. (1999a). Econophysics: Can physicists contribute to the science of economics? *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, *269*(1), 156–169. https://doi.org/10.1016/S0378-4371(99)00185-5

Stanley, H. E., Amaral, L. A. N., Canning, D., Gopikrishnan, P., Lee, Y., & Liu, Y. (1999b). Econophysics: Can physicists contribute to the science of economics? *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, *269*(1). https://doi.org/10.1016/S0378-4371(99)00185-5

Stanley, M. H. R., Amaral, L. A. N., Buldyrev, S. V., Havlin, S., Leschhorn, H., Maass, P., Salinger, M. A., & Stanley, H. E. (1996). Scaling behaviour in the growth of companies. *Nature*, *379*(6568). https://doi.org/10.1038/379804a0

Sternberg, R. J., & Gordeeva, T. (1996). The anatomy of impact: What makes an article influential? *Psychological Science*, *7*(2). https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.1996.tb00332.x

van Eck, N. J., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, *84*(2). https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3

Vandewalle, N., & Ausloos, M. (1997). Coherent and random sequences in financial fluctuations. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, *246*(3–4). https://doi.org/10.1016/S0378-4371(97)00366-X

Verspagen, B., & Werker, C. (2004). Keith Pavitt and the invisible college of the economics of technology and innovation. *Research Policy*, *33*(9). https://doi.org/10.1016/j.respol.2004.07.010

Zebende, G. F., Santos Dias, R. M. T., & de Aguiar, L. C. (2022). Stock market efficiency: An intraday case of study about the G-20 group. In *Heliyon* (Vol. 8, Issue 1). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08808

Zhang, D., Zhang, Z., & Managi, S. (2019). A bibliometric analysis on green finance: Current status, development, and future directions. *Finance Research Letters*, *29*. https://doi.org/10.1016/j.frl.2019.02.003

Zhang, L., Ling, J., & Lin, M. (2022). Artificial intelligence in renewable energy: A comprehensive bibliometric analysis. In *Energy Reports* (Vol. 8). https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.347

## 3.6 *Interdependência no mercado de energias limpas*

[1]

**Interdependence in the clean energy market: community dynamics in networks**

**Abstract**
This article explores interdependence in the clean energy market using complex network analysis to investigate a time series of market indices from selected companies in the sector. The transition to a clean and renewable energy matrix is a global necessity, as it reduces environmental impacts and offers economic potential for this sector. Studies have investigated the dynamics of the clean energy market in relation to other energy sources, revealing interdependence among their indices, which indicates connectivity and a strong potential for market contagion. A time series of daily index returns from companies responsible for technological development, production, and management of global clean energy was analyzed through complex networks using Detrended Cross-Correlation Analysis to estimate the interdependence and connectivity of these indices across different time scales. The results indicated that indices with higher kurtosis exhibit antipersistent memory, suggesting the presence of extreme returns. The constructed networks indicate variations in the formation of clusters with higher connectivity over time; this variability denotes the existence of different relationships, levels of interdependence, and co-movement. The returns of Wilderhill Clean Energy and Nasdaq Clean Edge Green Energy may serve as indicators of fluctuations in the clean energy market due to their strong interaction within their respective communities. These results provide insights into the dynamics of the clean energy market and demonstrate varying levels of interdependence within the context of the economic impacts of the renewable energy sector's expansion.

**Keywords:** Renewable energy; Financial market; Connectivity; Clustering; $\rho_{DCCA}$; Complex networks.

**Interdependência no mercado de energias limpas: dinâmica de comunidade em redes**

**Resumo**
O presente artigo estuda a relação de interdependência no mercado de energias limpas a partir das séries temporais dos índices de mercado de algumas empresas do segmento, via redes complexas. A transição para uma matriz energética limpa e renovável é uma realidade de demanda mundial, pois promove redução dos impactos ambientais, além das potencialidades econômicas desse segmento. Estudos apresentam a dinâmica do mercado de energias limpas com outras fontes de energias, mostrando a existência da interdependência entre os seus índices, indicando conectividade e forte possibilidade de contágio entre esses mercados. Para alcançar nosso objetivo, estudamos as séries temporais dos retornos de índices diários de empresas responsáveis pelo desenvolvimento tecnológico, produção e gerenciamento de energias limpas no mundo, a partir da análise de redes ponderada pelo coeficiente $\rho_{DCCA}$, para estimar a relação de interdependência/conectividade desses índices em diferentes escalas temporais. Nossos achados indicam que os índices com maior curtose apresentam memória antipersistentes, implicando na existência de retornos extremos. As redes construídas apontam uma variação ao longo da escala temporal na formação de grupos com maior conectividade, e tal variabilidade indica a existência de diferentes relações, níveis de interdependência e presença de comovimentos. Os retornos das empresas Wilderhill clean energy e Nasdaq clean edge green energy podem ser indicadores de prováveis flutuações do mercado de energias limpas diante da intensa interação com que eles estabelecem com os demais elementos das comunidades. Os resultados desta pesquisa fornecem informações sobre a dinâmica do mercado de energias

[1] Artigo submetido a revista Estudo econômicos da USP

limpas e determinam a existência dos níveis de interdependência diante dos impactos econômicos da expansão do setor de energias renováveis.

**Palavras-chave:** Energias renováveis; Mercado financeiro; Conectividade; agrupamento; $\rho_{DCCA}$; Redes Complexas.

**Classification JEL**
**F15, G10, Q40**

## 1. Introduction

Energy production is one of the essential factors for sustaining human life and development worldwide. The increased need for energy and the consumption of fossil fuels (petroleum, coal, and natural gas) has driven climate change, which affects global quality of life (Araújo et al. 2022). Contrastingly, there is a growing trend of research studies and investments in the clean energy sector (Santana et al. 2023), as evidenced by the emergence of specialized companies in the financial market.

In this study, clean energy is defined as the energy from production processes without pollutant residues, especially those related to gases that increase the greenhouse effect, and are mostly renewable (Montecinos and Carvajal 2018; UN 2023; Iberdrola 2025). Clean energy sources recognized globally include wind, photovoltaic, hydroelectric, hydrogen, biomass, geothermic, and tidal energy.

Studies on the renewable energy market have addressed many subjects (Alharbi et al. 2023; Andrean et al. 2024). Some governmental and non-governmental organizations have frequently published reports describing the importance of transitioning to a sustainable energy production matrix. The International Renewable Energy Agency (IRENA) reported a record increase in technological development and the implementation of renewable energy sources in 2023, as it reduces production costs by 81% compared to fossil fuel sources (IRENA 2024). This increase is consistent with the IRENA proposal to triple renewable energy production and double energy efficiency by 2030, meeting the seventh sustainable development goal of the United Nations (SDG7; UN 2023), which establishes "access to affordable, reliable, sustainable, and modern energy for all".

Government incentives through public policies, international cooperation, and changes in global human behavior have established a new perspective on energy consumption. The dynamics of this economic sector have favored the growth of specialized companies in the development, production, and management of clean energy. The increasing trend in this sector

has transformed energy commercialization policies, requiring large companies to adapt to this new production perspective and enabling new commercial opportunities (Unruh et al. 2016).

Disputes among the main global economies (China, USA, EU) in the renewable energy market have driven record economic growth in the sector. The Energy Technology Perspectives 2024 (ETP-2024), published by the International Energy Agency (IEA), projects that the global clean energy market could grow from US$ 700 billion to more than US$ 2 trillion in the next decade because of the ongoing energy transition. However, few studies have investigated the interdependence among the indices of large companies in the renewable energy sector over time. The analysis of time series of these indices can provide insights into future scenarios, offer commercial opportunities, and guide decision-making and strategic actions for financial managers.

The study of interdependence between two or more series (indices) can be described as a correlation, integration, connectivity, or coupling analysis (Assunção et al. 2021; Pietrzak et al. 2017; Silva Filho 2014; Santana, Horta, Revez, et al. 2023; Kristoufek and Ferreira 2018; Mantegna and Stanley 1999). An interdependent economic system implies a complex relationship characterized by interactivity, multiplicity, dynamism, non-linearity, adaptability, and evolution among its elements (Mantegna and Stanley 1999; Rodrigues et al. 2024).

The analysis of the complexity of interactions in the financial market based on network analysis has yielded innovative insights. The topological structure of a complex network provides a simpler way to understand problems or temporal dynamics, whose data are often challenging to process and analyze (Forest 2020; Barabási and Pósfai 2016).

Studies on connectivity levels and their dynamic interactions over time, based on network topology and cluster formation, can characterize the affinity among their elements (Barabási 2003). Some studies have demonstrated the potential of network structures for analyzing interdependence using cross-correlation analysis (Bonanno et al. 2004; Santana et al. 2024; Shin, Lim, and Min 2020; Adam et al. 2021).

In this context, the objective of this study was to investigate the interdependence of a time series of market indices of clean energy companies based on their connectivity within complex networks using Detrended Cross-Correlation Analysis ($\rho_{DCCA}$). The dynamics of cluster formation over time were analyzed, identifying indices with greater affinity and the connectivity of each element within the cluster.

## 2. Literature Review

The quality of the energy structure is essential for economic and sustainable development; historically, petroleum has been one of the indicators of a country's economic health (Santana et al. 2023). Several studies have reinforced the need for and supported the transition of the global energy matrix, with a gradual shift from fossil-fuel based energy production to clean and renewable energy sources (Santana et al. 2023; Cantarero 2020; Alharbi et al. 2023; Ray 2019). The low environmental impact and production costs of clean energy have demonstrated the economic potential of the energy transition process (IRENA 2024; Cantarero 2020).

In addition to climate concerns regarding fossil-fuel based energy production, changes in political structures, wars, and conflicts among petroleum-producing countries have promoted domestic clean energy production, which is sustainable and less susceptible to external fluctuations (Ray 2019). Despite its importance, few studies have analyzed the clean energy market structure. Some have demonstrated the interdependence and connectivity structure of clean energy, non-clean energy, and carbon market indices based on a topological analysis of complex networks, indicating a strong likelihood of contagion among these markets (Qiao et al. 2023). Market contagion is defined as the transmission of volatility of one financial index to another, commonly perceived in interdependent markets.

Feng, Liu, and Yang (2024) analyzed the commercial patterns of 59 countries from 2000 to 2020 using complex network analysis and reported greater development of the renewable energy sector in countries with more extensive commercial interactions. They also reported that the digital economy and financial independence favor the growth and reinforcement of this energy sector.

Geng et al. (2021) studied interdependence relationship and market contagion in the returns from the petroleum and clean energy markets. They reported a strong interdependence between these markets, indicating that petroleum is the recipient in this relationship. In addition, the results indicate a greater likelihood of market contagion in this relationship when fluctuation are associated with negative news.

Ferrer et al. (2018) evaluated the connectivity between petroleum prices and the stock performance of clean energy companies in the USA, identifying that the connectivity and volatility of returns are significant in the short term (a maximum of five days). The results indicated a decoupling of renewable energy companies from the traditional energy market. Additionally, similar to Geng et al. (2021), they found that petroleum prices absorb fluctuations in the renewable energy market.

The interdependence relationships in the clean energy financial market analyzed in the present study were based on the returns from clean energy companies. Correlation analysis of time

series, combined with network dynamics and affinity cluster formations, was used to jointly measure interdependence across several indices.

The use of networks provides several resources and metrics that enable the quantification of the degree of interaction and/or the effect among series (indices), allowing the identification and measurement of correlations (the theoretical hypothesis of interdependence) and co-movements. In addition to metrics, the topological structure of networks facilitates the understanding of the global and complex dynamics of a set of elements, as well as their communities of interaction and proximity (Artime et al. 2024).

Recent studies have demonstrated the potential of complex networks for analyzing financial data and yielding innovative insights in the financial market (Mata 2020; Artime et al. 2024; Clauset, Newman, and Moore 2004; Shin, Lim, and Min 2020; Santana et al. 2024; Xu et al. 2020; Cheng et al. 2022; Hou and Pan 2022).

## 3. Materials and Methods

### 3.1. Materials

The indices of large companies responsible for global clean energy production and management were analyzed to examine the economic, political, and financial dynamics of the clean energy market. These companies included Global Clean Energy, Clean Energy Fuels, Clean Energy Technologies, China Solar & Clean Energy Solutions, Tisdale Clean Energy, S&P Global Clean Energy, Wilderhill Clean Energy, and Nasdaq Clean Edge Green Energy. Daily return data from 2018 to 2023 were used, with 1538 data points, to characterize and qualify the level of interdependence by pairing the series according to date.

### 3.2. Methods

A complex network structure was constructed using Detrended Cross-Correlation Analysis ($\rho_{DCCA}$) to analyze fluctuations in return indices across different time scales ($n$) and to identify and characterize their interdependence and co-movements. Data collection and preprocessing consisted of tabulation, selection, series pairing, graphical data representation, descriptive analysis, autocorrelation (using the DFA exponent $\alpha_{DFA}$), and cross-correlation (using the coefficient $\rho_{DCCA}$). The applied cross-correlation coefficient, developed by Zebende (2011), is

derived from Detrended Fluctuation Analysis (DFA) and Detrended Cross-Correlation Analysis (DCCA) (Podobnik and Stanley 2008) and is defined by the following equation:

$$\rho_{DCCA}(n) \cong \frac{F^2_{DCCA}(n)}{F_{DFA_{x_i}}(n) \times F_{DFA_{y_i}}(n)} \quad (1)$$

The coefficient $\rho_{DCCA}$ between two series $x_i$ and $y_i$ varies across the time scale range of $4 \leq n \leq {}^{N}/_{4}$, where $N$ represents the series length and $n$ indicates the time scale. Equation (1) yields dimensionless results that characterize correlations varying within the interval $-1 \leq \rho_{DCCA} \leq 1$, as shown in Table 1 (Silva et al. 2015; Zebende, Brito, and Castro 2020; Brito 2021; Everaldo Freitas Guedes 2019; Oliveira Filho, Guedes, and Rodrigues 2023). Additionally, the correlations can be classified as strong, moderate, or weak, as shown in Table 2.

**Table 1 – Detrended Cross-Correlation Coefficients ($\rho_{DCCA}$).**

| $\rho_{DCCA}$ | Description |
|---|---|
| 1 | Perfect cross-correlation |
| 0 | No cross-correlation |
| -1 | Perfect anti-cross-correlation |

Source: Zebende (2011)

**Table 2 – Possible ranges for the cross-correlation coefficient ($\rho_{DCCA}$)**

| Characteristic | $\rho_{DCCA}$ |
|---|---|
| Strong | ±0.666 → ±0.999 |
| Moderate | ±0.333 → ±0.666 |
| Weak | ±0.000 → ±0.333 |

Source: Zebende (2011)

Subsequently, the correlations were analyzed to construct complex networks, assuming each index as a vertex and the coefficient of correlation as the weight of the edge that links them. The $\rho_{DCCA_{x,y}}$ was transformed into a Euclidean distance (Equation 2) to meet the metric properties of a network and the optimal representation of its topological structure (Loibel 2007; Lima 2007), as more thoroughly described by Gower (1966), providing a visual representation in which indices with greater interdependence are the closest to each other.

$$d_{x,y}(n) = 1 - \rho_{DCCA_{x,y}}(n) \quad (2)$$

where $d_{x,y}(n) = 0$ represents a perfect positive correlation, $d_{x,y}(n) = 1$ represents no correlation, and $d_{x,y}(n) = 2$ represents anticorrelation or perfect negative correlation. This transformation facilitates a more consistent topological interpretation of the connectivity structure based on the proximity between vertices (Santana et al. 2024).

Moderate and strong correlations were analyzed in the present study to establish the connectivity among vertices. Clusters were identified in each network structure at all time scales $n$, using the 'cluster_optimal' function of the igraph package in R, which maximizes modularity (Brandes et al. 2008; Csardi and Nepusz 2006; Newman 2003).

A total of 29 network structures were developed, with identification of clusters across a time scale ($n = 4$ to $n = 362$) in days. The quality of the interactions and connectivity of indices (vertices) within the community were assessed by determining the cluster distance of $v_i$ in relation to the other elements within $C$ ($dC_{v_i}$), according to Equation 3:

$$dC_{v_i}(n, C) = \sum_{i=1}^{k} \left(1 - \rho_{DCCA_{i,j}}(n)\right) \Big/ k - 1 \quad (3)$$

where $\rho_{DCCA_{i,j}}$ is the correlation between the series $x_i$ and $y_i$ represented respectively by vertices $v_i$ and $v_j$ within cluster $C$; $k$ is the number of vertices of the community, with $i \neq j$. The $dC_{v_i}$ ranges from 0 to 2, with $0.333 < dC_{v_i} < 0.666$ denoting moderate interaction and $dC_{v_i} < 0.333$ denoting strong interaction with the other vertices of the cluster. Therefore, the lower the $dC_{v_i}$, the higher its interaction, connectivity between $v_i$ and $G$, and the evidence of global interdependence, co-movements, and fluctuation of series $x_i$ propagated to other elements of the community. The statistical procedures were performed using the R program (R Core Team 2025).

## 4. Results and Discussion

### 4.1. Temporal dynamics, descriptive analysis, and memory/persistence

The temporal dynamics of returns, $r(t) = \ln {}^{i(t\ +\ 1)}\big/_{i(t)}$, from 2018 to 2023 (Figure 1A) demonstrated that most series varied within ±0.5, while the values for the company China Solar & Clean Energy Solutions exhibited the greatest volatility and extreme values. The variation in most returns was within ±0.10; however, the indices of Tisdale Clean Energy had large fluctuations and extreme values (Figure 2B). Overall, the indices of the companies shown in Figure 1B had the lowest volatility.

The indices became more stable from 2022 onwards, exhibiting reduced fluctuations. The security of the markets is evidenced by the valuation and stability of market indices of these companies from the first months of 2021 onwards. This is due to the energy crisis caused by the COVID-19 pandemic and the Ukraine-Russia war, which disrupted the supply of petroleum, coal, and natural gas, particularly in Europe (Santana et al. 2023; Chen et al. 2023).

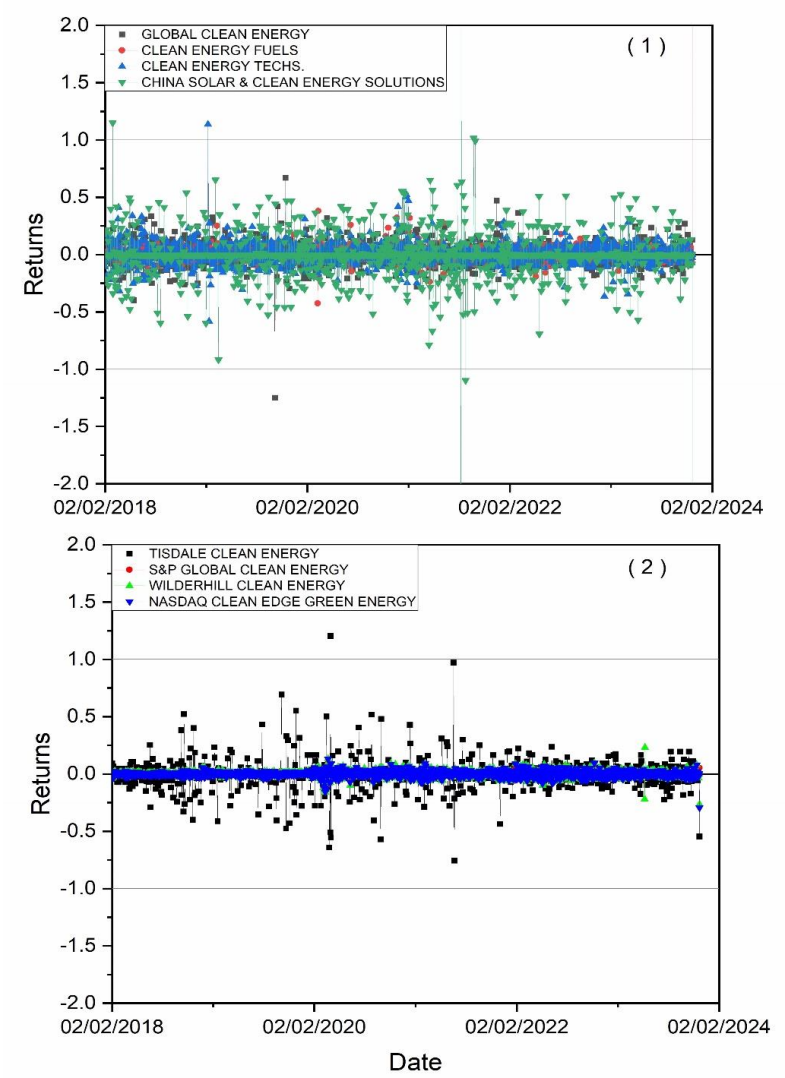



**Figure 1 – Returns of companies in the renewable energy sector: Global Clean Energy, Clean Energy Fuels, Clean Energy Technologies, China Solar & Clean Energy Solutions (A), Tisdale Clean Energy, S&P Global Clean Energy, Wilderhill Clean Energy, and Nasdaq Clean Edge Green Energy (B).**

The temporal description of the volatility of the indices denotes the presence of more consolidated companies, presenting reduced risks, despite China Solar & Clean Energy Solutions and Tisdale Clean Energy having exhibited greater variations. The small fluctuation in the indices of most companies suggests a strong market with favorable growth projections. The progressive increase in the volume of ongoing research correlating the economy (Santana et al. 2023) with concerns on natural resource demand for human survival (Yasin, Ahmad, and Chaudhary 2020; Wackernagel et al. 2019) can explain these market dynamics.

The mean returns were approximately zero (Table 3) and, according to Figure 1, China Solar & Clean Energy Solutions and Tisdale Clean Energy exhibited greater standard deviations and amplitudes. Contrastingly, Wilderhill Clean Energy, S&P Global Clean Energy, and Nasdaq Clean Edge Green Energy exhibited reduced variability.

**Table 3 – Descriptive statistics.**

| Index | M | SD | R | SK | K |
|---|---|---|---|---|---|
| Global Clean Energy | 0.002 | 0.088 | 1.919 | -1.340 | 30.982 |
| Clean Energy Fuels | 0.000 | 0.048 | 0.806 | 0.617 | 12.265 |
| Clean Energy Technologies | 0.001 | 0.089 | 1.719 | 1.653 | 20.946 |
| China Solar & Clean Energy Solutions | 0.000 | 0.188 | 5.040 | -0.565 | 47.083 |
| Tisdale Clean Energy | -0.002 | 0.099 | 1.960 | 1.498 | 31.660 |
| S&P Global Clean Energy | 0.000 | 0.017 | 0.235 | -0.381 | 7.333 |
| Wilderhill Clean Energy | 0.000 | 0.027 | 0.451 | -0.146 | 8.434 |
| Nasdaq Clean Edge Green Energy | 0.000 | 0.024 | 0.287 | -0.297 | 3.987 |

M = mean; SD = standard deviation; R = range SK = skewness; K = kurtosis.

Regarding the distribution, most indices exhibited negative and weak asymmetry, i.e., the mode was higher than the mean and median, but they were close. However, Clean Energy Technologies and Tisdale Clean Energy exhibited strong positive asymmetry. Confirming the dispersion measurements, the indices of China Solar & Clean Energy Solutions, Tisdale Clean Energy, and Clean Energy Technologies exhibited higher kurtosis, indicating a greater probability of extreme events and increased investment risk.

The reference values for identifying and qualifying the autocorrelation/memory of the time series are shown in Table 4. In summary, $\alpha_{DFA} \simeq 0.5$ represents no memory in the series, $0 < \alpha_{DFA} < 0.5$ represents antipersistent memory, and $\alpha_{DFA} > 0.5$ represents persistent memory. The DFA exponents for the returns of indices of the analyzed companies is shown in Table 5.

**Table 4. – Detrended Fluctuation Analysis (DFA) exponent parameters for evaluating long-range autocorrelation in time series.**

| $\alpha_{DFA}$ | Correlation | Condition |
|---|---|---|
| $\boldsymbol{\alpha_{DFA} < 0.5}$ | Autocorrelated | Antipersistent memory |
| $\boldsymbol{\alpha_{DFA} \simeq 0.5}$ | Uncorrelated | No memory |
| $\boldsymbol{\alpha_{DFA} > 0.5}$ | Autocorrelated | Persistent memory |

Source: Adapted from Guedes et al. (2019), Kristoufek (2014), and Peng et al. (1994).

**Table 5 – Detrended Fluctuation Analysis (DFA) exponent for the companies: Global Clean Energy, Clean Energy Fuels, Clean Energy Technologies, China Solar & Clean Energy Solutions, Tisdale Clean Energy, S&P Global Clean Energy, Wilderhill Clean Energy, and Nasdaq Clean Edge Green Energy. The error found for α_DFA was approximately ±0.01.**

| Index | Autocorrelation exponent $\alpha_{DFA}$ |
|---|---|

| | |
|---|---|
| Global Clean Energy | 0.37 |
| Clean Energy Fuels | 0.55 |
| Clean Energy Technologies | 0.41 |
| China Solar & Clean Energy Solutions | 0.29 |
| Tisdale Clean Energy | 0.28 |
| S&P Global Clean Energy | 0.54 |
| Wilderhill Clean Energy | 0.50 |
| Nasdaq Clean Edge Green Energy | 0.49 |

The return indices of Nasdaq Clean Edge Green Energy and Wilderhill Clean Energy exhibited no memory and were deemed random, and the indices of S&P Global Clean Energy and Clean Energy Fuels exhibited similar dynamics. However, the other companies exhibited antipersistent memory, suggesting higher volatility and a trend of alternation between positive and negative returns. This characteristic may represent an opportunity in the short term.

### 4.2. Clustering and connectivity dynamics

The clustering dynamics of vertices were assessed using cluster formation over the time scale, the interdependence among indices, and the connectivity of each vertex within its community. The indices and their representation as network vertex are shown in Table 6.

**Table 6 – Representation of indices in the network structure.**

| Indices | Representation of indices |
|---|---|
| Global Clean Energy | A |
| Clean Energy Fuels | B |
| Clean Energy Technologies | C |
| China Solar & Clean Energy Solutions | D |
| Tisdale Clean Energy | E |
| S&P Global Clean Energy | F |
| Wilderhill Clean Energy | G |
| Nasdaq Clean Edge Green Energy | H |

The $\rho_{DCCA}$ coefficient was used to measure the correlation among indices. This method is widely employed to measure interdependence in financial indices (Santana et al. 2023; Hou and Pan 2022; Zhang et al. 2018; L. Silva et al. 2019; Zebende, Dias, and Aguiar 2022). A network structure representing the global affinity among the indices of the companies was developed to enhance the identification of their interdependence. The clusters identified for the network across different time scales are shown in Table 7.

**Table 7 – Cluster formation distribution across time scales.**

| Time scale | Communities | Time scale | Communities |
|---|---|---|---|

| | | | |
|---|---|---|---|
| n = 4 | {B, F, G, H} | n = 69 | {B, C, F, H} and {D, G} |
| n = 5 | {B, F, G, H} | n = 79 | {B, C, F, G} and {D, H} |
| n = 7 | {B, F, G, H} | n = 91 | {B, C, D, F, G, H} |
| n = 9 | {B, F, G, H} | n = 104 | {B, C, D, F, G, H} |
| n = 11 | {B, F, G, H} | n = 119 | {A, B} and {C, D, F, G, H} |
| n = 13 | {B, F, G, H} | n = 135 | {A, B} and {C, D, F, G, H} |
| n = 16 | {B, F, G, H} | n = 154 | {A, B} and {C, D, F, G, H} |
| n = 20 | {B, F, G, H} | n = 174 | {A, D, H} and {B, C, F, G} |
| n = 23 | {B, C, F, G, H} | n = 198 | {A, B, G} and {C, D, F, H} |
| n = 28 | {B, F, H} and {C, G} | n = 223 | {A, B, C, D, F, G, H} |
| n = 33 | {B, D, F, H} and {C, G} | n = 252 | {A, B, C, D, F, G, H} |
| n = 38 | {B, F, H} and {C, D, G} | n = 285 | {A, B, F} and {C, D, G, H} |
| n = 45 | {B, F, H} and {C, D, G} | n = 321 | {A, B, F} and {C, D, G, H} |
| n = 52 | {B, F, H} and {C, D, G} | n = 362 | {A, B, F} and {C, D, G, H} |
| n = 60 | {B, F, H} and {C, D, G} | - | - |

The clusters indicated that the indices have similar dynamics, i.e., display co-movements in their returns. The cluster structure varied over time, indicating that the fluctuations show varying interdependence relationships across time scales (Table 7). However, vertices F and H consistently remained in the same cluster at small and medium scales ($n = 4$ to $n = 252$). A single cluster structure was observed at large scales ($n > 252$), but relationships among indices within each community can be observed at small and medium scales.

Despite the absence of memory in B, F, G, and H, they formed a cluster at small scales that suggested interactions and co-movements among these indices. This may represent some degree of predictability when compared to each other.

The organization of these clusters across time scales (small, medium, and large scales) (Figure 2) showed that vertex E did not establish a connection with the other network members. Despite its antipersistent memory, the lack of interaction with the other network members indicates that its fluctuations do not occur simultaneously with the other indices.

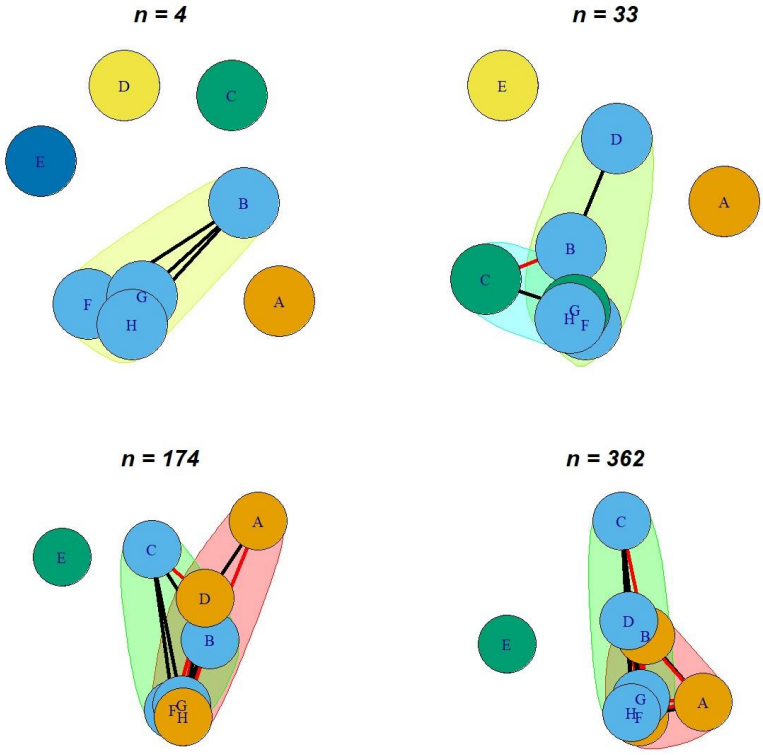



**Figure 2 – Complex networks at small, medium, and large scales, identifying communities.**

Interactions between vertices from different clusters were observed at medium and large scales (Figure 2; red edges). The clusters exhibited vertices with high interaction, including elements from different clusters interacting with those from other communities. For example, vertices {A, B, C, D, F, G, H} formed a subnetwork at the scale $n > 119$. The vertices became closer and more connected as the time scale increased, suggesting joint fluctuations among the indices. The vertex interaction structure within the community at small, medium, and large scales, using the $dC$ measure, is shown in Figures 3, 4, and 5; $dC$ measures the proximity of the vertex to the dynamics of its community, i.e., the lower the $dC$, the lower the vertex distance from cluster dynamics.

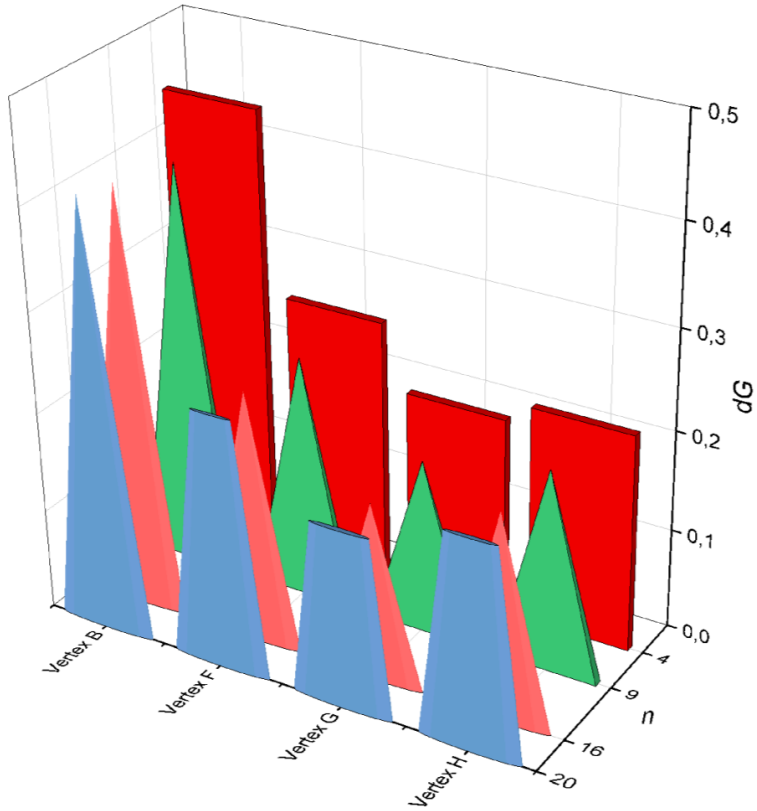



**Figure 3 – Cluster identification and vertex interaction at small scales.**

The formation of a single community comprising vertices $\{B, G, F, H\}$ was observed across the scale $n = 4$ to $n = 20$. The degree of interaction of these vertices within the community increased as the time scale increased, forming a denser cluster (Figure 3). Vertex $G$ was consistently closer to other network elements, suggesting that the fluctuations of the indices of the company Wilderhill Clean Energy is closely similar to those of other indices within the community. Contrastingly, Clean Energy Fuels exhibited fluctuations that were more isolated from those of other cluster elements.

Figure 4 illustrates the formation of two distinct clusters: $C1 = \{B, F, H\}$ and $C2 = \{C, D, G\}$. This community structure was identified across the scales $n = 38$ to $n = 60$ and $n = 119$ to $n = 154$. The community structure varied across the scale $n > 60$ to $n < 119$ (Table 7).

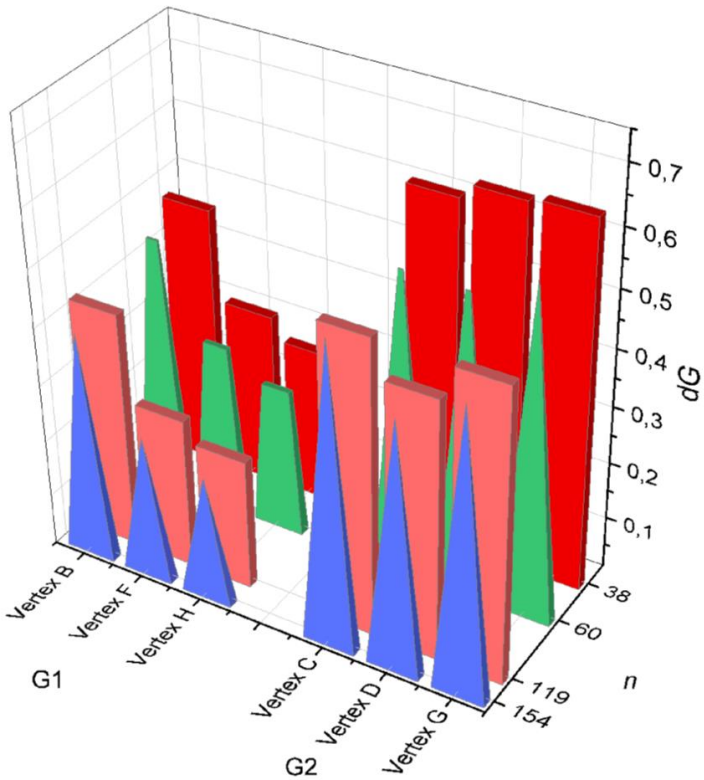



**Figure 4 – Cluster identification and vertex interaction at medium scales.**

The $C1$ community structure was dense, highlighting vertices $F$ and $H$. In contrast, $C2$ community exhibited a less dense structure, where vertices $C$ and $G$ were the most distant network elements within this cluster. The density within both clusters increased as time scale progressed, but the application of the $dC$ measure facilitates the assessment of vertex proximity to community dynamics, as well as the identification of potential co-movements among indices within clusters. Two distinct clusters were formed at large scales ($n = 285$ to $n = 321$ and $n = 362$): $C1 = \{A, B, F\}$ and $C2 = \{C, D, G, H\}$ (Figure 5).

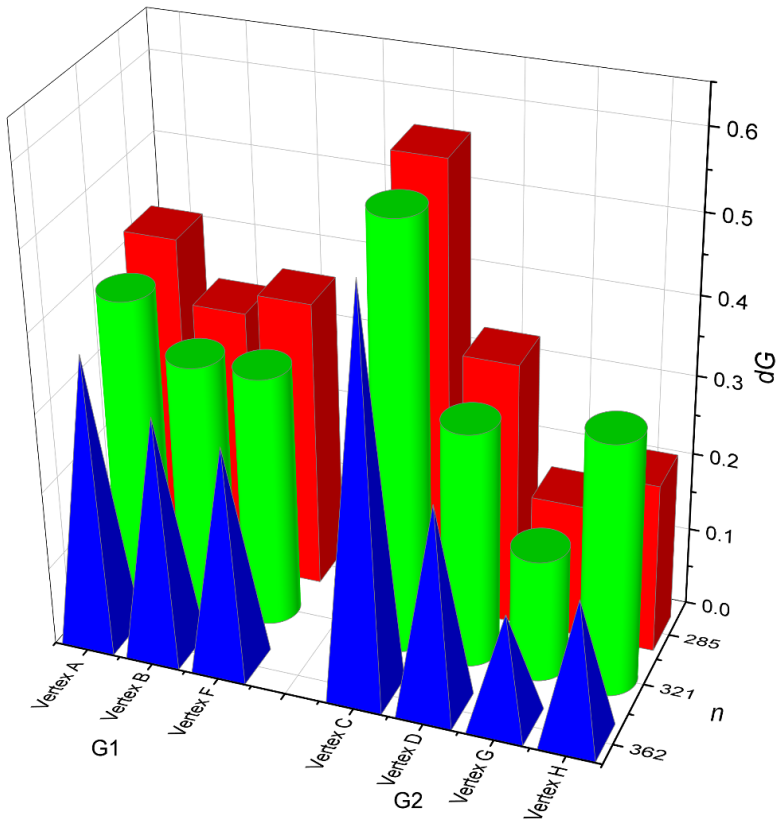



**Figure 5 – Cluster identification and vertex interaction at large scales.**

Clusters $C1$ and $C2$ became denser as the time scale increased (Figure 5). However, the density in $C1$ increased gradually, with vertex $F$ closest to the cluster dynamics. Vertices $G$ and $H$ in $C2$ exhibited the lowest distance within this cluster. Contrastingly, vertex $C$ exhibited the highest distance and lowest interaction within the community.

Despite the network structure not exhibiting stable dynamics, it became more connected and denser, and the clusters included elements with higher affinity but with different degrees of interaction and effects on the community (Figures 3, 4, and 5).

In practical terms, the indices of the companies China Solar & Clean Energy Solutions and Tisdale Clean Energy exhibited higher volatility, but both have antipersistent memory, indicating alternation between positive and negative returns. The perception of this dynamic may indicate opportunities in the short term; moreover, China Solar & Clean Energy Solutions exhibited indices interacting within the community, differing from Tisdale Clean Energy.

Overall, Clean Energy Fuels, S&P Global Clean Energy, Wilderhill Clean Energy, and Nasdaq Clean Edge Green Energy had positive returns with low volatility and random dynamics.

Despite this random characteristic, their indices exhibited co-movements that were observed in their interactions within the community.

The distribution of clusters illustrates a map of the global and complex interactions and synchronous volatility among indices (Table 7 and Figure 2). The interactive distribution of indices of the companies Wilderhill Clean Energy and Nasdaq Clean Edge Green Energy in the cluster formation and the proximity of their interactions with other indices suggest that they may serve as indicators of fluctuations in the clean energy market.

## 5. Final Considerations

The clean energy sector has grown worldwide, particularly in solar and wind energy. Investments in management and production within this sector have been observed through research development, economic incentives, and governmental policies. In this context, financial markets have exhibited a dynamic and complex structure in the relationships among companies in this sector.

The interdependence relationships of large companies in the energy sector, responsible for clean energy production management, were analyzed based on the returns of indices to understand the temporal dynamics of these financial markets. Additionally, a descriptive and persistence analysis was conducted based on the Detrended Fluctuation Analysis exponent ($\alpha_{DFA}$). The Detrended Cross-Correlation Analysis coefficient ($\rho_{DCCA}$) was applied to measure the synchronicity in fluctuations of returns, describing the complex network structure, where the vertices represent the indices and the correlation coefficient represents the weighting between edges.

The network dynamics facilitate the identification of clusters with significant interaction and co-movements. Furthermore, the degree of interaction of each element within the community was measured based on their distances, at small, medium, and large scales.

The results represent an innovative contribution to financial analysis in the clean energy sector, presenting a novel methodological approach to market analysis. In practical terms, it provides a description of the interaction among the indices of large companies, enabling a delineation of fluctuations and their future dynamics.

The results indicated that:

- The mean returns were approximately zero (as expected), however, there was high volatility and evidences of antipersistent memory, especially for indices of China Solar & Clean Energy Solutions, Tisdale Clean Energy, and Global Clean Energy. Thus, these companies

exhibited a trend of alternation between positive and negative returns, suggesting opportunities in the short term;

- The network structures revealed the formation of clusters (indices with high interdependence); however, their composition is dynamic across the time scale, with the existence of elements having a higher effect on the community;
- The indices of Tisdale Clean Energy exhibited no interdependence with the others and were isolated at all time scales, which may be due to the company's uranium exploration;
- Wilderhill Clean Energy and Nasdaq Clean Edge Green Energy formed clusters and exhibited a strong interdependence relationship within their communities at small, medium, and large scales. Fluctuations in the indices of these companies may serve as indicators for performance analysis in this market.

The expansion of the clean and renewable energy sector is expected to continue, driven by technological development, incentive policies for research development, and implementation actions. The dynamic structure of the financial market requires continuous research into the exploration of these markets, identifying the evolution of these interactions over time.

**ACKNOWLEDGEMENTS**

The authors would like to thank the State University of Feira de Santana, especially the Postgraduate Program in Modeling in Earth and Environmental Sciences, for their contributions during the development of the research.

**CONFLICTS OF INTEREST**

The authors declare no conflicts of interest.

**REFERENCES**

Adam, Anokye M, Kwabena Kyei, Simiso Moyo, Ryan Gill, and Emmanuel N Gyamfi. 2021. "Multifrequency Network for SADC Exchange Rate Markets Using EEMD-Based DCCA." *Journal of Economics and Finance* 46 (1). New York: Springer US: 145–66. doi:10.1007/s12197-021-09560-w.

Alharbi, Samar S., Md Al Mamun, Sabri Boubaker, and Syed Kumail Abbas Rizvi. 2023. "Green Finance and Renewable Energy: A Worldwide Evidence." *Energy Economics* 118 (February): 106499. doi:10.1016/j.eneco.2022.106499.

Andrean, Giovanni, Jose Miguel Bermudez, Sara Budinis, Leonardo Collina, and Elizabeth Connelly. 2024. "Energy Technology Perspectives." Paris. www.iea.org.

Araújo, Raiane Sodré, Flaviany Luise Nogueira Sousa, Paulino Sousa Vanderley, Suzana Oliveira da Silva Bentes, Luiz Moreira Gomes, and Fernanda Carla Lima Ferreira. 2022. "Fontes de Energias Renováveis: Pesquisas, Tendências e Perspectivas Sobre as Práticas Sustentáveis." *Research, Society and Development* 11 (11): e468111133893. doi:10.33448/rsd-v11i11.33893.

Artime, Oriol, Marco Grassia, Manlio De Domenico, James P. Gleeson, Hernán A. Makse, Giuseppe Mangioni, Matjaž Perc, and Filippo Radicchi. 2024. "Robustness and Resilience of Complex Networks." *Nature Reviews Physics* 6 (2): 114–31. doi:10.1038/s42254-023-00676-y.

Assunção, Bruno de Freitas, Ikaro Daniel de Carvalho Barreto, Tatijana Stosic, and Borko Stosic. 2021. "Correlações Em Séries Temporais de Preços de Manga Produzida No Vale Do São Francisco." *Research, Society and Development* 10 (12). Research, Society and Development: e266101220460. doi:10.33448/rsd-v10i12.20460.

Barabási, Albert-László. 2003. *Linked: How Everything Is Connected to Everything Else and What It Means for Business, Science and Everyday Life*. 1st ed. Vol. 1. New York: Plume Books.

Barabási, Albert-László, and Márton. Pósfai. 2016. *Network Science*. Cambridge: Cambridge University Press. http://barabasi.com/networksciencebook/.

Bonanno, George, Guido Caldarelli, Fabrizio Lillo, Salvatore Micciche, Nicolas Vandewalle, and Rosário Mantegna. 2004. "Networks of Equities in Financial Markets." *The European Physical Journal B - Condensed Matter* 38 (2): 363–71. doi:10.1140/epjb/e2004-00129-6.

Brandes, Ulrik, Daniel Delling, Marco Gaertler, Robert Gorke, Martin Hoefer, Zoran Nikoloski, and Dorothea Wagner. 2008. "On Modularity Clustering." *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering* 20 (2): 172–88. doi:10.1109/TKDE.2007.190689.

Brito, Andreia Almeida. 2021. "Modelagem Computacional de Auto-Correlações e Correlações Cruzadas Aplicada Em Variáveis Meteorológicas e Simuladas." Salvador: Centro Universitário Senai Cimatec.

Cantarero, Maria Mercedes. 2020. "Of Renewable Energy, Energy Democracy, and Sustainable Development: A Roadmap to Accelerate the Energy Transition in Developing Countries." *Energy Research & Social Science* 70 (December): 101716. doi:10.1016/j.erss.2020.101716.

Chen, Shengming, Ahmed Bouteska, Taimur Sharif, and Mohammad Zoynul Abedin. 2023. "The Russia–Ukraine War and Energy Market Volatility: A Novel Application of the Volatility Ratio in the Context of Natural Gas." *Resources Policy* 85 (August): 103792. doi:10.1016/j.resourpol.2023.103792.

Cheng, Dawei, Fangzhou Yang, Sheng Xiang, and Jin Liu. 2022. "Financial Time Series Forecasting with Multi-Modality Graph Neural Network." *Pattern Recognition* 121 (January): 108218. doi:10.1016/j.patcog.2021.108218.

Clauset, Aaron, M. E. J. Newman, and Cristopher Moore. 2004. "Finding Community Structure in Very Large Networks." *Physical Review E* 70 (6): 066111. doi:10.1103/PhysRevE.70.066111.

Csardi, Gabor, and Tamas Nepusz. 2006. "The Igraph Software Package for Complex Network Research." *InterJournal* Complex Systems. https://igraph.org.

Feng, Chao, Yu-Qi Liu, and Jun Yang. 2024. "Do Energy Trade Patterns Affect Renewable Energy Development? The Threshold Role of Digital Economy and Economic Freedom." *Technological Forecasting and Social Change* 203 (June): 123371. doi:10.1016/j.techfore.2024.123371.

Ferrer, Román, Syed Jawad Hussain Shahzad, Raquel López, and Francisco Jareño. 2018. "Time and Frequency Dynamics of Connectedness between Renewable Energy Stocks

and Crude Oil Prices." *Energy Economics* 76 (October): 1–20. doi:10.1016/j.eneco.2018.09.022.

Geng, Jiang-Bo, Changyu Liu, Qiang Ji, and Dayong Zhang. 2021. "Do Oil Price Changes Really Matter for Clean Energy Returns?" *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 150 (October): 111429. doi:10.1016/j.rser.2021.111429.

Gower, Jonh. 1966. "Some Distance Properties of Latent Root and Vector Methods Used in Multivariate Analysis." *Biometrika* 53 (3): 325–38.

Guedes, E F, Paulo Ferreira, Andreia Dionísio, and G F Zebende. 2019. "An Econophysics Approach to Study the Effect of BREXIT Referendum on European Union Stock Markets." *Physica A* 523. Elsevier B.V: 1175–82. doi:10.1016/j.physa.2019.04.132.

Guedes, Everaldo Freitas. 2019. "Modelo Computacional Para Análise de Movimento e Co-Movimentos de Mercados Financeiros." Tese de Doutorado, Salvador: Centro universitário Senai Cimatec.

Hou, Lei, and Yueling Pan. 2022. "Evaluating the Connectedness of Commodity Future Markets via the Cross-Correlation Network." *Frontiers in Physics* 10 (September). doi:10.3389/fphy.2022.1017009.

Iberdrola. 2025. "¿Qué Son Las Energías Limpias?" *Iberdrola*.

IRENA. 2024. *Renewable Power Generation Costs in 2023*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency. www.irena.org.

Kristoufek, Ladislav. 2014. "Measuring Correlations between Non-Stationary Series with DCCA Coefficient." *Physica A* 402. Elsevier B.V: 291–98. doi:10.1016/j.physa.2014.01.058.

Kristoufek, Ladislav, and Paulo Ferreira. 2018. "Capital Asset Pricing Model in Portugal: Evidence from Fractal Regressions." *Portuguese Economic Journal* 17 (3). Berlin/Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg: 173–83. doi:10.1007/s10258-018-0145-5.

Lima, Elon Lages. 2007. *Espaços Métricos*. 1st ed. Rio de Janeiro: IMPA.

Loibel, Gilberto. 2007. *Introdução à Topologia*. São Paulo : Unesp.

Mantegna, Rosário, and Eugene Stanley. 1999. *Introduction to Econophysics: Correlations and Complexity in Finance*. 1st ed. Vol. 1. Cambridge: Cambridge University Press.

Mata, Angélica Sousa da. 2020. "Complex Networks: A Mini-Review." *Brazilian Journal of Physics* 50 (5): 658–72. doi:10.1007/s13538-020-00772-9.

Montecinos, Sonia, and Danilo Carvajal. 2018. *Energías Renovables: Escenário Actual y Perpectivas Futuras*. 1st ed. Vol. 1. La Serena: Universidad De La Serena.

Newman, M. E. J. 2003. "The Structure and Function of Complex Networks." *SIAM Review* 45 (2): 167–256.

Oliveira Filho, Florêncio Mendes, Everaldo Freitas Guedes, and Paulo Canas Rodrigues. 2023. "Networks Analysis of Brazilian Climate Data Based on the DCCA Cross-Correlation Coefficient." *PLOS ONE* 18 (9): e0290838. doi:10.1371/journal.pone.0290838.

Peng, Chang, Sergey Buldyrev, S Havtin, Michael Simons, Eugene Stanley, and Assaf Goldbergerz. 1994. "Mosaic Organization of DNA Nucleotides." *PHYSICAL REVIEW E*. Vol. 49.

Pietrzak, Michał Bernard, Marcin Fałdziński, Adam P. Balcerzak, Tomáš Meluzín, and Marek Zinecker. 2017. "Short-Term Shocks and Long-Term Relationships of Interdependencies Among Central European Capital Markets." *Economics & Sociology* 10 (1): 61–77. doi:10.14254/2071-789X.2017/10-1/5.

Podobnik, Boris, and Eugene Stanley. 2008. "Detrended Cross-Correlation Analysis: A New Method for Analyzing Two Nonstationary Time Series." *Physical Review Letters* 100 (8). doi:10.1103/PhysRevLett.100.084102.

Qiao, Sen, Zi Xin Guo, Zhang Tao, and Zheng Yu Ren. 2023. “Analyzing the Network Structure of Risk Transmission among Renewable, Non-Renewable Energy and Carbon Markets.” *Renewable Energy* 209 (June): 206–17. doi:10.1016/j.renene.2023.03.133.

R Core Team. 2025. “R: A Language and Environment for Statistical Computing.” Vienna, Austria. https://www.R-project.org/.

Ray, Parthasarathi. 2019. “Renewable Energy and Sustainability.” *Clean Technologies and Environmental Policy* 21 (8): 1517–33. doi:10.1007/s10098-019-01739-4.

Rodrigues, Rui Manuel dos Santos Vigário, Thiago Pires Santana, Rui Manuel Teixeira Santos Dias, Aloísio Machado da Silva Filho, Rosa Galvão, Gilney Figueira Zebende, and Sidalina Gonçalves. 2024. “Econophysics, State of the Science and Bibliographic Production: A Bibliometric Analysis.” *Revista de Gestão Social e Ambiental* 18 (11): e010035. doi:10.24857/rgsa.v18n11-234.

Santana, Thiago Pires, Nicole Rebolo Horta, Mariana Ramos Chambino, Rui Manuel Teixeira Santos Dias, Rodrigo Nogueira Vasconcelos, Aloísio Machado Silva Filho, and Gilney Figueira Zebende. 2023. “Interdependence and Contagion Effects in Agricultural Commodities Markets: A Bibliometric Analysis, Implications, and Insights for Sustainable Development.” *Equilibrium. Quarterly Journal of Economics and Economic Policy* 18 (4): 907–40. doi:10.24136/eq.2023.029.

Santana, Thiago Pires, Nicole Horta, Catarina Revez, Rui Manuel Teixeira Santos Dias, and Gilney Figueira Zebende. 2023. “Effects of Interdependence and Contagion on Crude Oil and Precious Metals According to PDCCA: A COVID-19 Case Study.” *Sustainability* 15 (5): 3945. doi:10.3390/su15053945.

Santana, Thiago Pires, Rogério Matias, Regivaldo Ferreira, Aloisio Macahdo Silva Filho, Rosa Galvão, Miguel Varela, Rui Dias, and Gilney Figueira Zebende. 2024. “A Study of The Market of Fat Ox and Corn in Bahia/Brazil Via Weighted Networks By P_DCCA.” *Revista de Gestão Social e Ambiental* 18 (7): e07007. doi:10.24857/rgsa.v18n7-130.

Shin, Ki-Hong, Gyuchang Lim, and Seungsik Min. 2020. “Dynamics of the Global Stock Market Networks Generated by DCCA Methodology.” *Applied Sciences* 10 (6). MDPI AG: 2171. doi:10.3390/app10062171.

Silva Filho, Aloísio Machado. 2014. “AUTOCORRELAÇÃO E CORRELAÇÃO CRUZADA: TEORIAS E APLIÇÕES.” Tese de Doutorado, Salvador: Centro Universitário Senai Cimatec.

Silva, Lázaro, Everaldo Guedes, Paulo Ferreira, Andreia Dionísio, and Gilney Figueira Zebende. 2019. “Px,y between Open-Close Stock Markets.” *Physica A* 534. Elsevier B.V: 122152. doi:10.1016/j.physa.2019.122152.

Silva, Marcus Fernandes, Éder Johnson Pereira, Aloisio Machado Silva Filho, Arleys Pereira Nunes Castro, José Garcia Vivas Miranda, and Gilney Figueira Zebende. 2015. “Quantifying Cross-Correlation between Ibovespa and Brazilian Blue-Chips: The DCCA Approach.” *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications* 424 (November). Elsevier B.V.: 124–29. doi:10.1016/j.physa.2015.01.002.

UN. 2023. “What Is Sustainable Development?” *United Nations*. December 19. https://www.un.org/sustainabledevelopment/blog/2023/08/what-is-sustainable-development/.

Unruh, Gregory, David Kiron, Nina Kruschwitz, Martin Reeves, Holger Rubel, and Alexander Felde. 2016. “Investing for a Sustainable Future.” *MIT Sloan Management Review Research Report*, May.

Wackernagel, Mathis, David Lin, Mikel Evans, Laurel Hanscom, and Peter Raven. 2019. “Defying the Footprint Oracle: Implications of Country Resource Trends.” *Sustainability* 11 (7): 2164. doi:10.3390/su11072164.

Xu, Runjie, Chuanmin Mi, Rafał Mierzwiak, and Runyu Meng. 2020. "Complex Network Construction of Internet Finance Risk." *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications* 540 (February): 122930. doi:10.1016/j.physa.2019.122930.

Yasin, Iftikhar, Nawaz Ahmad, and M. Aslam Chaudhary. 2020. "Catechizing the Environmental-Impression of Urbanization, Financial Development, and Political Institutions: A Circumstance of Ecological Footprints in 110 Developed and Less-Developed Countries." *Social Indicators Research* 147 (2): 621–49. doi:10.1007/s11205-019-02163-3.

Zebende, Gilney Figueira. 2011. "DCCA Cross-Correlation Coefficient: Quantifying Level of Cross-Correlation." *Physica A* 390 (4). Elsevier B.V: 614–18. doi:10.1016/j.physa.2010.10.022.

Zebende, Gilney Figueira, Andrea Almeida Brito, and Arley Castro. 2020. "DCCA Cross-Correlation Analysis in Time-Series with Removed Parts." *Physica A* 545. Elsevier B.V: 123472. doi:10.1016/j.physa.2019.123472.

Zebende, Gilney Figueira, Rui Dias, and Lázaro Aguiar. 2022. "Stock Market Efficiency: An Intraday Case of Study about the G-20 Group." *Heliyon*. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.heliyon.2022.e08808.

Zhang, Zuochao, Yongjie Zhang, Dehua Shen, and Wei Zhang. 2018. "The Dynamic Cross-Correlations between Mass Media News, New Media News, and Stock Returns." *Complexity (New York, N.Y.)* 2018. Hoboken: Hoboken: Hindawi: 1–11. doi:10.1155/2018/7619494.

Capítulo Quatro

# Considerações Finais

## 4.1 Conclusões

Esta Tese teve por objetivo mapear a dinâmica interativa e temporal dos índices financeiros do setor energético, metais preciosos e agropecuário a partir da análise de correlação, utilizando como base os métodos $DFA$ e $DCCA$ e interpretando os resultados segundo a perspectiva teórica de interdependência e efeito de contágio.

Para isso: desenvolvemos dois estudos bibliométricos, analisamos a relação de interdependêndia e efeito de contágio em entre petróleo e metais preciosos com relação a crise da COVID-19; estudamos as flutuações e intergração nos preços das *commodities* agropecuárias na Bahia e formação de *Clusters* em índices financeiros no mercado de energia limpa. Os resultados alcançados estão organizados em artigos, Capítulo. 3.

As análises bibliométricas, constantes nas Seções 3.2 e 3.5, possuem abordagens distintas, mas complementares, ressaltando a evolução e os desafios no estudo da ciência econômica contemporânea. As duas abordagens enfatizam a necessidade de integração multidisciplinar, metodológica e colaborativa para enfrentar os desafios globais, crises econômicas e ambientais para uma economia mais resiliente e sustentável. Identificamos um aumento exponencial de publicações a partir de 2015, com destaque para pesquisas envolvendo *commodities* como milho, trigo e soja. A sustentabilidade aparece como eixo central, sobretudo no que tange à transição energética e aos impactos ambientais. Além disso, países como China e Estados Unidos destacam-se no cenário científico em ambos os estudos bibliométricos, abordando temas que envolvem *commodities*, Econofísica, finanças, mercados e sustentabilidade. Nota-se, ainda, a influência de fatores geopolíticos, sanitários e conflitos internacionais na produção de estudos e divulgação de informações em tempo real, para tomada de decisões mais precisas e previsão de possíveis cenários.

A crise sanitária da COVID-19, iniciada em 2020, reestruturou a dinâmica de mercado em todo o mundo, com destaque às fontes de energia que estão na base do processo produtivo. A pandemia impactou a relação de interdependência e provocou efeito contágio entre os mercados de petróleo bruto (WTI e Brent) e metais preciosos (ouro e prata). A análise mostrou que, enquanto o par Brent–WTI manteve seu forte vínculo sem sofrer influência do evento crítico, os pares envolvendo petróleo e metais mostraram mudanças estruturais, sugerindo que os investidores passaram a tratar ouro e prata como ativos de proteção durante a instabilidade 3.1.

Na Seção 3.3 e 3.4 analisamos a dinâmica do mercado de *commodities* agropecuárias na Bahia, boi gordo, o milho e a soja. Identificamos a presença de autocorrelação persistente nos índices de preço das três *commodities*, indicando que preços passados influenciam os preços futuros. Além disso, os dados revelaram que os preços são não estacionários. Por outro lado, os retornos das séries tendem à antipersistência.

Em relação à interdependência entre os mercados de boi gordo e milho, identificamos forte conectividade no mercado de boi gordo em todas as escalas temporais, o que sugere um mercado integrado e coeso. Em contrapartida, o mercado de milho apresenta essa conectividade apenas em escalas maiores, o que implica maior independência e melhores oportunidades de arbitragem no curto prazo.

No artigo da Seção 3.6 avaliamos o mercado de energias limpas a partir dos índices de grandes empresas do setor. A *China Solar & Clean Energy Solutions* e *Tisdale Clean Energy* possuem retornos com maior curtose e memória antipersistente, que indica ocorrência de retornos extremos e maior volatilidade. Observamos a formação de vários *clusters* ao longo das escalas temporais, revelando dinâmicas distintas de interdependência e comovimento entre os índices. Notavelmente, os índices *Wilderhill Clean Energy* e *Nasdaq Clean Edge Green Energy* demonstraram forte interação dentro de suas comunidades, que podem servir como indicadores de flutuações no mercado.

Nossos resultados oferecem contribuições que geram impactos sociais e orientam decisões econômicas. Do ponto de vista científico, destaca-se a aplicação inovadora do coeficiente $\rho_{DCCA}$ para medir interdependência e contágio com base na análise de redes complexas e a formação de *clusters*, além de estudos bibliométricos, que mapeiam tendências globais de pesquisa e desenvolvimento tecnológico.

Numa perspectiva socioeconômica, nosso trabalho evidencia os desafios em relação à transição energética, a expansão no mercado de energias renováveis e à proteção de ativos agropecuários para manutenção da segurança alimentar. Além disso, os estudos fornecem *insights* valiosos para gestão de riscos, mostrando como a conectividade entre mercados influencia a diversificação de portfólios.

As descobertas também apoiam políticas públicas e o monitoramento de índices financeiros para evitar contágios sistêmicos, além de mostrar o papel da infraestrutura no desenvolvimento regional. Em síntese, os artigos combinam rigor analítico e relevância prática, oferecendo ferramentas para enfrentar desafios complexos, por meio de uma visão integrada que equilibra eficiência econômica, equidade social e sustentabilidade ambiental.

## 4.2 Perspectivas futuras

Pretendemos em momentos futuros discutir, com colaboradores, a possibilidade de desenvolver ações de extensão que se apoiem nos estudos desenvolvidos. Além das atividades que aproximem a pesquisa da extensão, pretende-se desenvolver pesquisas que analisem a dinâmica de mercado com base na análise de correlação pelo expoente $\alpha_{DFA}$ e coeficiente $\rho_{DCCA}$. Com destaque aos temas:

- Crises de Mercado: contágio nos preços das *commodities* agropecuárias ( milho, soja e boi gordo) e diesel no Brasil via redes ponderadas pelo $\rho_{DCCA}$;
- Sustentabilidade e Transição energética: relação entre biocombustíveis e segurança alimentar no Brasil a partir da correlação dinâmica de preços;
- *Commodities* Agropecuárias: integração do mercado Brasil/Bahia para as *commodities* de milho, soja e boi gordo.
- Interdependência no mercado de energias limpas no Brasil

Metodologicamente, pretendemos explorar os indicadores e métricas de redes com base no coeficiente $\rho_{DCCA}$ e sua representação topológica na interpretação de dinâmicas de mercado.

Apêndice A

# Anexo I

### Outras Produções

Durante os semestres iniciais do projeto de doutoramento houve possibilidade de colaborações em outros trabalhos de pesquisa e extensão. Como resultado inicial dessa colaboração temos três artigos publicados e apresentados abaixo A.1, A.2 e A.3.

BOCEHM
Boletim Cearense de Educação e História da Matemática

**e-ISSN:** 2447-8504 **DOI**: 10.30938/bocehm.v10i29.10347

# CONCEITOS DA TEORIA DOS GRAFOS NO DESENVOLVIMENTO DO RACIOCÍNIO LÓGICO APLICADOS AOS JOGOS COM ESTUDANTES DA EJA

## GRAPH THEORY CONCEPTS IN THE DEVELOPMENT OF LOGICAL REASONING APPLIED TO GAMES WITH EJA STUDENTS

Thiago Pires Santana[1]; Rogério Gomes Matias[2];
Paulo Henrique Gomes Santana[3]

## RESUMO

O texto discute o desenvolvimento de uma oficina direcionada ao público da Educação Jovens e Adulto (EJA) em uma escola pública em Feira de Santana, Bahia que teve como objetivo investigar as potencialidades e limitações no desenvolvimento do raciocínio lógico e interpretação da realidade fazendo uso dos jogos grafos no contexto de uma experiência didática. A oficina abordou, elementarmente, conceitos iniciais e intuitivos sobre a Teoria dos Grafos, que são apresentados neste trabalho, desde o seu contexto histórico até algumas aplicações. O desenvolvimento dessa oficina teve ênfase nos jogos, explorando a relação destes com grafos e o caráter dinâmico e educativo que há na sua utilização.

**Palavras-chave:** Grafos; Jogos; Raciocínio Lógico; Problema das pontes.

## ABSTRACT

The text discusses the development of a workshop aimed at the public of youth and adult education (EJA) in a public school in Feira de Santana, Bahia, which aimed to investigate the potentials and limitations in the development of logical reasoning and interpretation of reality using graphic games in the context of a didactic experience. The workshop approached, in an elementary way, initial and intuitive concepts about Graph Theory, which are present in this work, from its historical context to some applications. The development of this workshop was highlighted in games, exploring their relationship with graphs and the dynamic and educational nature of their use.

**Keywords:** Graphs; Games; Logical reasoning; Bridge problem.

[1]Mestre em Ciências da Educação pela Universidade da Madeira (Uma). Mestre em Matemática pela Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS). Doutorando pelo Programa de Modelagem em Ciências da Terra e Meio Ambiente pela Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS). Professor da Secretaria de Educação do Estado da Bahia e da Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS). Departamento de Ciências Exatas, Feira de Santana, BA, Brasil. E-mail: tpsantana@uefs.br.
ORCID iD: https://orcid.org/0000-0002-6353-1293.

[2] Mestre em Computação Aplicada pela Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS). Professor da Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS). Departamento de Ciências Exatas, Feira de Santana, BA, Brasil. E-mail: rgmatias@uefs.br.
ORCID iD: https://orcid.org/0000-0002-2478-3578.

[3] Mestre em Computação Aplicada pela Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS). Doutorando em Educação na Universidade Federal da Bahia (UFBA). Professor da Secretaria de Educação do Estado da Bahia, Serra Preta, BA, Brasil. E-mail: paulohenrique@ufba.br.
ORCID iD: https://orcid.org/0000-0002-0659-3906.

## Introdução

Este texto origina-se de pesquisas e trabalhos desenvolvidos acerca dos conceitos de grafos aplicados aos jogos, nos estudos do projeto de pesquisa: "Jogos Combinatórios: Jogos Grafos", desenvolvido pela área de Matemática Aplicada da Universidade Estadual de Feira de Santana. Objetivando a disseminação dos conceitos matemáticos aplicados a jogos combinatórios em grafos, tanto para estudantes da graduação quanto para estudantes do ensino básico.

As atividades do projeto de pesquisa foram direcionadas aos jogos, baseando-se no desenvolvimento de estratégias vencedoras a partir dos estudos em grafos. Foram a partir das buscas por soluções estratégicas de problemas em jogos que houve o desenvolvimento da Teoria dos Grafos com diversas contribuições de renomados matemáticos. (GONÇALVES, 2007).

Grafos são estruturas discretas, que matematicamente são usados para modelar uma variedade de problemas em diversos e importantes campos do conhecimento. (OSTROSKI; MENONCINI, 2009). Possuem uma diversa aplicabilidade, a exemplo de circuitos elétricos e eletrônicos em projetos de computadores, como também, na bioquímica molecular no uso de algoritmos para estudo da estrutura do DNA. (NETTO, 2006). Além disso, existe conexão dos conceitos de grafos com a Ciência das Redes, que usa elementos da Teoria dos Grafos como nós e arestas para modelar redes de distribuição de rotas aéreas, rodoviárias, ferroviárias, tráfego de pedestres e redes sociais. (NEWMAN, 2003).

Tendo em vista que a Teoria dos Grafos possui uma vasta aplicabilidade e com o intuito de fomentar entre estudantes o interesse pela matemática. Este texto tem como ponto de partida problemas associados ao projeto supracitado que são oriundos das questões: "Quais aspectos e como a utilização de jogos grafos podem contribuir para o desenvolvimento do raciocínio lógico de estudantes?".

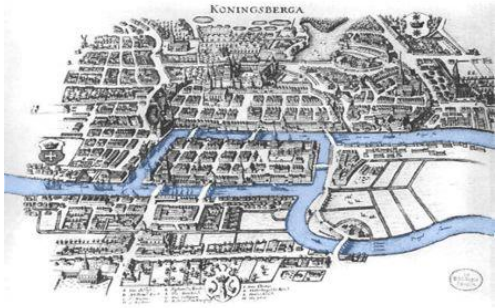
Diante dessas interrogações, este trabalho objetivou investigar as potencialidades e limitações no desenvolvimento do raciocínio lógico e interpretação da realidade fazendo uso dos jogos grafos no contexto de uma experiência didática.

## Alguns aspectos da Teoria dos Grafos e Jogos

Os conceitos fundamentais da Teoria dos Grafos aplicados aos jogos, contribuem para o desenvolvimento da Matemática Aplicada de forma crítica e investigativa, estabelecendo relações necessárias para uma construção reflexiva do pensamento e análise dos resultados.

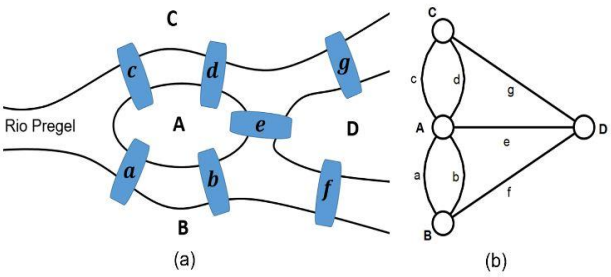
A origem da Teoria dos Grafos surge de uma problemática na cidade de Konigsberg (antiga Prússia), hoje Kaliningrado (Rússia), era uma cidade rodeada por dois braços do rio Pregel e sete pontes que a interligam as regiões vizinhas (Ver Figura 1). Segundo Gonçalves (2007), Barabási (2015) e Vulcani (2015), os moradores desta cidade habitualmente passeavam pelas pontes procurando fazer um caminho que passasse pelas sete pontes uma única vez, a intenção deste percurso ficou conhecido como o problema das pontes de Konigsberg.

**Figura 1.** Gravura adaptada da cidade de Konigsberg século XVII




**Fonte**: Disponível em: https://scilogs.spektrum.de/hlf/the-bridges-of-konigsberg/. Acesso: 05 jan. 2023.

**Figura 2**. Ilustração do mapa de Konigsberg em (a) – Grafo representativo do mapa em (b)[4]




[4] Grafos desenhados com o *software yEd Graph Editor*

**Fonte**: Elaboração dos autores

O problema das pontes chegou até o conhecimento do matemático Suíço Leonard Euler, que propôs uma solução representando as regiões de terra por letras maiúsculas (A, B, C, D) e as pontes por letras minúsculas (a, b, c, d, e, f, g) e seguidamente numa concepção de regiões de terra como vértices e pontes como arestas, como podemos observar na Figura 2.

A partir dessa representação Euler formulou a hipótese de que a solução do problema podia ser dada pela sequência de oito letras maiúsculas, com a condição de que houvesse duas combinações de duas letras AC (ou CA) e AB (ou BA) já que existem duas pontes conectando as regiões AB e AC, enquanto deveria aparecer somente uma vez as outras combinações, AD, CD e BD. Ele percebeu que cada região, poderia ser conectada por $n$ pontes a outras regiões quaisquer e que para cada uma teríamos um caminho de chegada e outro de saída, ou seja, para uma região com $n = 1$ ponte, esta região é o ponto de chegada ou saída; para uma região com $n = 3$ pontes teríamos duas saídas e uma chegada ou duas chegadas e uma saída, consequentemente, para uma região com $n = 5$ pontes, se partirmos dela teremos três saídas e duas chegadas, caso não saia dela teremos três chegadas e duas saídas. Genericamente, se o número de pontes ($n$) que liga uma região a outra for ímpar, aparecerá $\frac{(n+1)}{2}$ vezes na sequência que descreve o caminho. (GONÇALVES, 2007). Para o caso das pontes de Konigsberg é possível construir a Tabela 1 abaixo:

**Tabela 1**. Disposição do nº de vezes que um vértice é visitado no problema das pontes de Konigsberg.

| Regiões | Número de arestas (Pontes) | Vezes que um vértice aparece em um caminho |
|---|---|---|
| A | 5 | $\frac{5+1}{2} = 3$ |
| B | 3 | $\frac{3+1}{2} = 2$ |
| C | 3 | $\frac{3+1}{2} = 2$ |
| D | 3 | $\frac{3+1}{2} = 2$ |

**Fonte**: Elaboração dos autores

Na interpretação estabelecida por Euler para definição de um caminho que saísse de uma região qualquer e passasse por todas as pontes uma única vez, é preciso que qualquer sequência apresente um caminho em que o número de vezes que cada vértice aparece seja descrito como na Tabela 1. Portanto, temos obrigatoriamente uma sequência de nove vértices, $3 + 2 + 2 + 2 = 9$; desse modo, como a hipótese foi que a solução do problema podia ser dada pela sequência de oito letras maiúsculas (vértices), este argumento contradiz a hipótese formulada. Assim, Euler resolveu o problema das pontes de Konigsberg, chegando à conclusão que é impossível fazer um caminho que passe por todas as pontes uma única vez.

Destacamos que a argumentação para solucionar tal problema segue as descrições dadas por Leonard Euler no período da análise do mesmo. Essa problemática é considerada o marco inicial para o surgimento da Teoria dos Grafos que, segundo Barabási (2015), foi em meados de 1735 e tornou alguns problemas mais simples, permitindo uma visualização mais adequada e analítica dos fenômenos estudados.

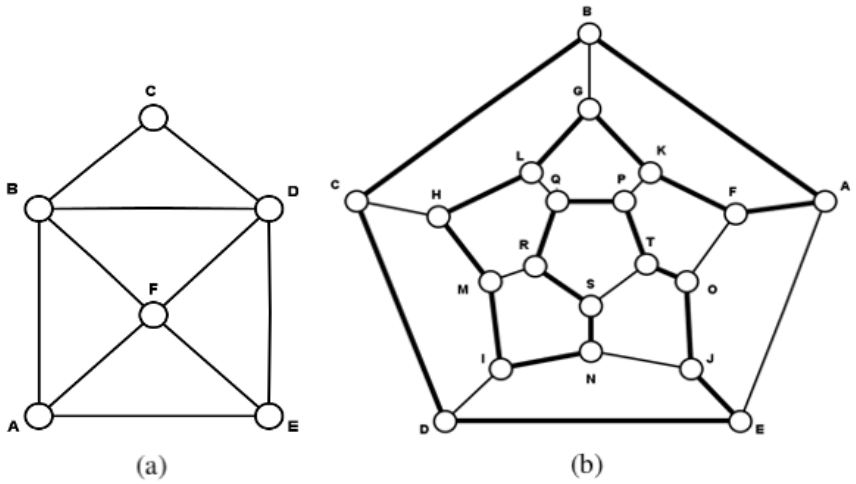
A organização do pensamento e o desenvolvimento do raciocínio lógico dedutivo, podem ser aguçados no estudo de problemas, no aprimoramento de técnicas de resoluções de desafios e até mesmo na utilização de estratégias para jogos de diversas naturezas. A ludicidade e o entretenimento são características intrínsecas aos jogos, além dessas características existentes, há conceitos matemáticos que pertencem às entrelinhas de alguns jogos, possibilitando encontrar por meio de uma estratégia, jogadas vencedoras. A formalização lógica dessas estratégias alinha à Matemática Aplicada, no que se refere a grafo, aos jogos e em especial aos combinatórios, tendo aplicabilidade, por exemplo, na ciência da computação. (SIEGEL, 2013).

Gonçalves (2007) e Vulcani (2015), entendem como Jogos Grafos, os jogos que podem ser resolvidos utilizando a Teoria dos Grafos ou mesmo os que se valem dessa Teoria para sua construção, definição de regras e/ou estruturas. Jogos que envolvem dois participantes, denominados esquerdo (E) e direito (D), que se alternam em movimentos, sem o uso de dados, cartas ou qualquer outro dispositivo randômico, onde os participantes possuem informações completas do estado do jogo são chamados de Combinatórios. (BERLEKAMP; CONWAY; GUY, 2001). Esses dois tipos de jogos não são necessariamente excludentes entre si, há possibilidades de que alguns jogos

combinatórios sejam reconhecidos como grafos, tanto quanto alguns jogos grafos possam ser combinatórios.

O chamado jogo do lápis é um clássico jogo considerado grafo que faz uso de conceitos da Teoria dos Grafos em suas regras. Esse jogo possui uma disposição semelhante à da intenção do problema das pontes de Konigsberg, pois consiste em traçar um caminho[5], a fim de encontrar uma trilha[6] partindo de um dos seus vértices. Sem levantar o lápis, deve-se percorrer todo desenho da "casa" (Ver Figura 4a) traçando as arestas uma única vez.

**Figura 4**. (a) Problema do desenho da "casa" – (b) Icosaedro: Interface do jogo dodecaedro.




**Fonte**: Elaboração dos autores

Os conceitos matemáticos envolvidos no jogo do lápis, estão relacionados aos resultados desenvolvidos na Teoria dos Grafos que garante a existência de tal percurso a partir da presença de dois vértices de grau[7] ímpar. Logo, a estratégia que possibilita a realização do desenho da "casa" dentro dos moldes do problema é partir de um vértice de grau ímpar e finalizar em outro de grau ímpar, ou seja, para realizar esse trajeto deverá iniciar no vértice A, da Figura 4a, e terminar no vértice E, ou vice-versa.

[5] Genericamente, um caminho em um grafo é uma sequência alternada de vértices e arestas.
[6] Uma trilha é um caminho em que todas as arestas são distintas.
[7] O grau de um vértice em um grafo é o número de arestas que esse vértice contém.

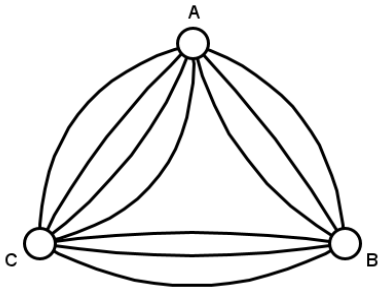
Um outro jogo grafo é o jogo do dodecaedro, conhecido também por "Icosian Game" devido aos 20 vértices que o dodecaedro possui, (ver interface do jogo na Figura 4b). Em uma das versões desse jogo, o jogador deverá encontrar um caminho que passe por todos os vértices começando e terminando no mesmo vértice, não repetindo os vértices anteriores, a exemplo do caminho A, F, K, G, L, H, M, I, N, S, R, Q, P, T, O, J, E, D, C, B, A. que está destacado na Figura 4b. Existem ainda, outras versões para o jogo dodecaedro, que pode ser disputada por dois jogadores, ver Gonçalves (2007), onde o jogo do dodecaedro se define como um jogo grafo e também combinatório.

Um jogo combinatório que também é um jogo grafo é o Nim, que pode ser jogado de diversas formas, com pilhas ou trilhas de objetos, tabuleiros e inclusive com o já mencionado grafo. O desenvolvimento do jogo se dá, em sua maioria, com jogadas de remoções de um determinado número de objetos e no caso dos grafos, com a remoção das arestas de forma alternada por cada participante, em todos os formatos, perde o jogador que não puder mais fazer retiradas. (RODRIGUES; SILVA, 2004). As regras dos jogos e/ou partidas são ajustadas para cada formato e podem ser adaptados os critérios de extração estabelecendo níveis de complexidade bem variáveis.

O jogo do Nim apresenta estratégias de jogadas vencedoras que dá a vitória ao participante que fizer uso, caso o oponente não adote a mesma tática, ou ainda garante ao menos o empate, caso ambos os participantes adotem as mesmas estratégias. Alguns resultados em Fukuyama (2003a; 2003b), demostrando estratégias vencedoras para caminhos e circuitos[8] ímpares em grafos. Do mesmo modo que, Flesch e Pradhan (2015) mostraram, com um conjunto de teoremas, as possibilidades de vitória ou derrota de um jogador, utilizando o jogo Nim em grafos específicos, sendo possível definir uma posição que permite a um dos jogadores vencer independentemente das jogadas que o oponente faça.

[8] Um caminho é fechado quando o primeiro vértice é igual ao último. Caso o caminho fechado tenha todos os vértices distintos, exceto o primeiro e último, os chamamos de ciclo ou circuito.

**Figura 5.** Grafo $C_3$ no jogo Nim




**Fonte**: Elaboração dos autores

Para um grafo cíclico de três vértices (Ver Figura 5) em um jogo Nim com a retirada de uma ou duas arestas, a estratégia que colocará um dos jogadores em uma posição vencedora, se dá quando há a existência de vértices com grau diferente dos demais. Assim, à estratégia é remover as arestas incidentes a um dos vértices de grau diferente, de modo a tornar os graus de todos os vértices iguais, ou seja, remove-se uma das arestas do vértice A do grafo representado na Figura 5, que seja incidente ao vértice C. Vale ressaltar que essa estratégia é válida somente para grafos que possuem todos os vértices conectados (formando um polígono) de três vértices. Para grafos com um número maior de vértices há estratégias distintas da que apresentamos.

## Metodologia

Os caminhos que foram determinados procurando responder como o objetivo traçado neste texto foi alcançado. Iniciamos compreendendo que o objeto de estudo é de natureza qualitativa por se tratar de uma pesquisa social que busca compreender o fenômeno social da aprendizagem, sua interação, regulação espontânea e informações não declaradas. (LAPASSADE, 2005).

Comum a vários métodos de pesquisa qualitativa, podemos destacar que a observação participante, por vezes com o auxílio de um diário de campo e registros de imagens, é um instrumento fundamental para o conhecimento de uma prática etnográfica, haja vista que, somente de dentro o pesquisador pode conhecer verdadeiramente uma dinâmica social e compreender os sentidos atribuídos aos atores envolvidos a ponto de

pesquisador e população pesquisada se tornarem um só. (LAPASSADE, 2005; MACEDO, 2006; BARBIER, 2004).

Deste modo, admitindo a perspectiva teórica e os recursos destacados acima, para investigar as potencialidades e limitações no desenvolvimento do raciocínio lógico e interpretação da realidade fazendo uso dos jogos grafos no contexto de uma experiência didática, foram organizadas oficinas em uma escola pública como forma de alcançar as intenções deste trabalho.

A implementação da oficina descrita acima ocorreu no Colégio Estadual Agostinho Fróes da Mota, na cidade de Feira de Santana e desenvolvida em 4 encontros consecutivos de 1h40, cada, numa turma com 11 estudantes, da Educação de Jovens e Adultos (EJA), disciplina de Matemática, Tempo de Aprender II, ensino médio. Após um estudo minucioso de livros e artigos, a oficina foi desenvolvida com o tema *Noções de Grafos a partir dos Jogos.*

A proposta foi organizada em alguns momentos:

- Primeiro momento: foi feito o "convite" à participação da atividade a partir de vídeos, imagens e a localização da Teoria dos Grafos em áreas de conhecimento e situações problema;
- Segundo momento: organização dos grupos de trabalho e leitura coletiva da seção (História Breve);
- Terceiro momento: discussão coletiva do problema das pontes de Konigsberg e apresentar intuitivamente os principais conceitos de grafos associando às aplicações na sociedade e discutindo-as;
- Quarto momento: resolução e socialização no quadro o problema do desenho com 16 vértices constante na lista de exercício;
- Quinto momento: formalização dos conceitos discutidos no terceiro momento e estudo das propriedades da Teoria dos Grafos;
- Sexto momento: resolução e socialização pelos estudantes dos problemas 1 e 2 (destacados abaixo).

Os registros foram feitos a partir de imagens e o diário de campo objetivando coletar as informações necessárias para uma análise crítica e reflexiva. Destacamos que todos os registros foram autorizados pelos participantes, respeitando o Estatuto da

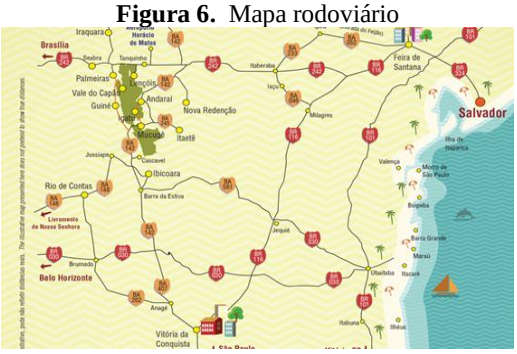
Criança e do Adolescente (Lei Nº 8.069/1990), Estatuto do Idoso (Lei Nº 10.741/2003) e da Criança com Deficiência (Lei Nº 5.296/2004).

As ações desenvolvidas pelos estudantes tomaram uma perspectiva holística, foram consideradas na avaliação cada contribuição na oficina, participação e discussão, iniciativa, colaboração nas atividades em grupo, perseverança na resolução dos problemas, integração com os outros participantes, síntese e argumentação, capacidade de projeção do conhecimento apreendido, conclusão e socialização da atividade final. Nesse sentido, assumimos a perspectiva de Luckesi (2005) quando define avaliação da aprendizagem como um processo amoroso, integrativo e inclusivo, dando suporte as mudanças necessárias a fim de construir melhores condições para alcançar os objetivos de aprendizagem.

Os problemas discutidos no sexto momento estão expostos nas questões a seguir:

1. Crie no mínimo dois grafos contemplando cada uma das estratégias discutidas.
2. Utilizando o mapa (Figura 6) escolha pelo menos cinco cidades e a partir das estradas mostradas trace um grafo para elas. Verifique, também, se é possível percorrer todas as estradas passando por elas uma única vez. Você pode utilizar só as BRs só as BAs ou ambas.

**Figura 6.** Mapa rodoviário




**Fonte**: Guia chapada diamantina - Mapa de acesso

Entre os diversos problemas que podem ser estudados e relacionados com grafos, a exemplo de redes sociais, redes elétricas, redes neurais, rotas de aviões, entre outros. Escolhe-se um mapa rodoviário da Figura 6, devido a característica desse mapa apresentar conexões de percepções acessíveis na construção do estudo das relações com grafos em que cada cidade pode ser representada por um vértice e as rodovias por arestas.

Discutir descritivamente sobre o desenvolvimento dos problemas nos encontros que contemplaram os momentos discriminados acima, é relacionar a teoria e prática na percepção das dificuldades e potencialidades na dinâmica das interações na sala com as motivações e/ou resistências dos estudantes no decorrer da oficina.

**Resultados e discussão**

Os resultados alcançados com a execução da oficina sobre os fundamentos da Teoria dos Grafos, ampara as perspectivas teóricas e metodológicas adotadas, cumprindo com os objetivos traçados nesta investigação.

Os momentos da oficina aconteceram em 4 encontros, respeitando o tempo pedagógico dos estudantes e aproveitando os discursos que emergiram das reflexões dos estudantes. Primeiramente foi anunciado aos estudantes, dias antes, que seria desenvolvido uma oficina com o tema grafos e foi solicitado a todos que pesquisassem, se possível na internet e com os recursos que tivessem, sobre o que é um grafo ou sobre a Teoria dos Grafos.

Chegado o primeiro encontro, iniciamos perguntando o que encontraram na realização da pesquisa, alguns se pronunciaram afirmando que tiveram dificuldades de compreensão, mas relataram: "É um ramo da matemática", "saiu dos problemas das pontes", "são desenhos com pontos e linhas", outros disseram que não puderam pesquisar. De maneira geral, buscamos neste momento motivar a turma para o desenvolvimento da atividade, haja vista que, a "motivação pode ser entendida como um processo e, como tal, é aquilo que suscita ou incita uma conduta, que sustenta uma atividade progressiva, que canaliza essa atividade para um dado sentido". (BALANCHO; COELHO apud MORAES; VARELA, 1996, p. 3).

Explicou-se posteriormente como seria o andamento da atividade bem como o desenvolvimento dos encontros e iniciamos com a apresentação de alguns grafos aplicados à teoria das redes (redes rodoviárias e redes ferroviária do estado da Bahia e de Feira de Santana, redes moleculares e neurais e redes sociais). Neste primeiro momento foi pedido para eles relacionarem as imagens e definirem o que seriam os grafos.

A representação das redes como exemplo de estruturas de grafo foi acertada, pois foi perceptível a identificação de novas informações em associação aos pré-requisitos e as referências que todos em sala possuíam, sendo o ponto de partida para a construção do

sequenciamento do raciocínio lógico. Entendemos como raciocínio lógico a estruturação dos pensamentos com o objetivo de resolver determinado problema, baseando-se nas informações contidas e deduzidas na situação. Em Chuí (2002), citado por Bastazini e Mori (2014) o desenvolvimento do raciocínio lógico é uma ferramenta essencial para a organização do pensamento na resolução de problemas do cotidiano.

Após a apresentação das imagens, a turma foi dividida em 4 grupos e foi disponibilizado para todos os estudantes um texto contendo a história da Teoria dos Grafos com o problema das pontes de Konigsberg, a solução de Euler, a associação dos problemas com o jogo/desafio de desenhar uma figura sem repetir o traço. Os estudantes fizeram uma leitura coletiva do texto e o professor foi complementando com algumas informações e desenhando no quadro o grafo representativo das pontes de Konigsberg, concluído a leitura da parte histórica, pediu-se que eles tentassem desenhar o grafo das pontes de Konigsberg sem repetir traço e levantar o lápis, destacamos que até o momento não se tinha discutido com a turma que o problema das pontes não tinha solução.

Com o desenvolvimento do encontro, percebemos que os estudantes não haviam considerado a possibilidade de que não houvesse solução para o problema e por isso tentavam encontrar a solução, mesmo desobedecendo às regras estabelecidas. Ao final do encontro, foi revelado que o problema das pontes não era possível de se resolver nas condições estabelecidas e que a análise desse problema gerado pelas pontes abriu possibilidades para a construção de conhecimento em várias áreas.

Percebemos que o problema apresentado no formato de um jogo, tem a sobrecarga causada pela introdução de novos conceitos minimizada, tornado o ambiente da sala mais leve aumentando a motivação e a colaboração nos grupos. Borin (1996), discute justamente a importância da utilização dos jogos nas aulas de matemática, salientando o importante papel para diminuir os bloqueios apresentados pelos alunos que apresentam dificuldades em matemática, além de diminuir as resistências à participação e favorecem aprendizagem. (TEIXEIRA; SANTOS, 2014).

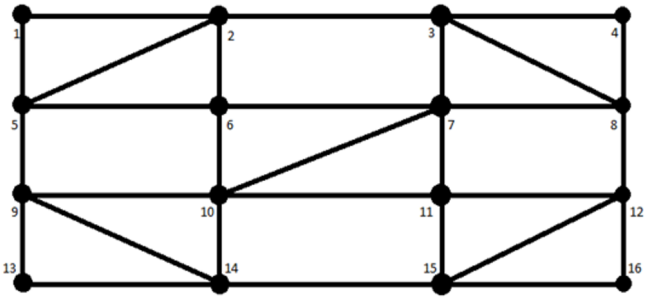
Em um segundo encontro, foi apresentado no quadro o desenho de um grafo semelhante à de uma casa, a mesma já apresentada na Figura 4a, sendo solicitado que a desenhassem seguindo as seguintes regras: não pode levantar o lápis do papel e não pode repetir o traço (orientações semelhantes ao problema das pontes de Konigsberg). Este desafio da “casa”, foi resolvido rapidamente, entretanto, alguns estudantes ainda

apresentavam soluções com variações a partir da subscrição ou supressão de algumas arestas do desenho.

Consideramos que a dinamicidade na resolução do desafio pelos estudantes não implica na facilidade do problema, mas atribuímos também ao começo da reestruturação do pensamento lógico pelos estudantes em detrimento da apresentação e exposição do problema das pontes que norteou as etapas de resolução desse desafio, haja vista que a busca dos estudantes pela compreensão do problema ou por estratégia de resolução fossem semelhantes ao do desafio de desenhar o caminho das pontes de Konigsberg, gerando indagações do tipo "esse problema possui solução?", e ainda "havendo solução está é única?". Desse modo, percebemos que o desenvolvimento da solução, tanto quanto das indagações do desafio da "casa", estabeleceu uma correspondência com o esquema sobre resolução de problemas de Polya (1995) que apresenta um roteiro para o processo de solução de um desafio: entender o problema, elaborar um plano, desenvolver o plano e verificar o resultado.

Em seguida foi apresentado aos grupos o problema do retângulo com 16 vértices, (Ver Figura 7). Com objetivo de construí-lo partindo dos vértices de grau ímpar (7 ou 10) sem levantar o lápis, antes que os estudantes iniciassem essa construção, foi apresentado a sequência (10, 7, 11, 12, 16, 15, 12, 8, 7, 3, 2, 6, 10, 11, 15, 14, 10, 9, 14, 13, 9, 5, 1, 2, 5, 6, 7), para que os mesmos analisassem e pudessem verificar a possibilidade de construção a partir dessa sequência.

**Figura 7.** Grafo de 16 vértices

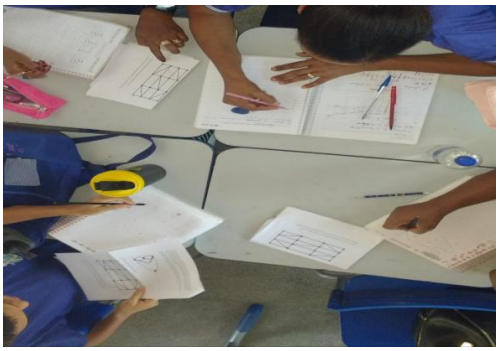



**Fonte:** Elaboração dos autores

Logo, os estudantes perceberam que a sequência não era possível e sentiram-se desafiados a pensar em outra possibilidade que satisfizesse o problema, nesta etapa os

grupos ficaram inquietos, todos discutindo se era possível encontrar uma sequência correta ou não. As discussões e socialização de ideias e raciocínios entres os estudantes reiteram a nossa percepção do desenvolvimento de suas habilidades quanto a concentração e organização do pensamento, em detrimento às provocações que os desafios já apresentados puderam promover. Essa análise converge com os pensamentos de Seara (2009, p. 16) que destaca que a abordagem de problemas por meio de desafios contribui para "a construção e organização do pensamento lógico-matemático; o desenvolvimento da capacidade de leitura e análise crítica; o auxílio na interpretação de outros tipos de textos e colabora para desmistificar a matemática, tornando-a prazerosa para o aluno".

**Figura 8.** Aplicação da oficina em grupo



**Fonte**: Elaboração dos autores

Na discussão da solução do desafio do retângulo foi apresentado aos estudantes, que as sugestões de iniciar o caminho que percorra todos os pontos pelos vértices 7 ou 10 é uma estratégia de resolução garantida por alguns resultados matemáticos e desse modo o momento foi oportuno para iniciar apresentação de alguns aspectos elementares da Teoria dos Grafos, de maneira informal.

No desenvolvimento da oficina, um pouco mais de 70% dos estudantes encontraram a solução, os bem-sucedidos leram algumas informações contidas no enunciado do próprio problema, fazendo uma correspondência geral, entre a solução e as estratégias de resolução. Estudantes de dois grupos não obtiveram sucesso, percebemos que o motivo foi devido ao desacreditarem na sequência que estavam desenvolvendo e abandonaram no meio do processo, demonstrando que em alguns casos, os estudantes

ainda não tinham o processo de organização do pensamento desenvolvido ou não foram persistentes, nos mostrando a importância do processo de motivação constante na construção da aprendizagem destacado por Balancho e Coelho, citado por Moraes e Varela (1996).

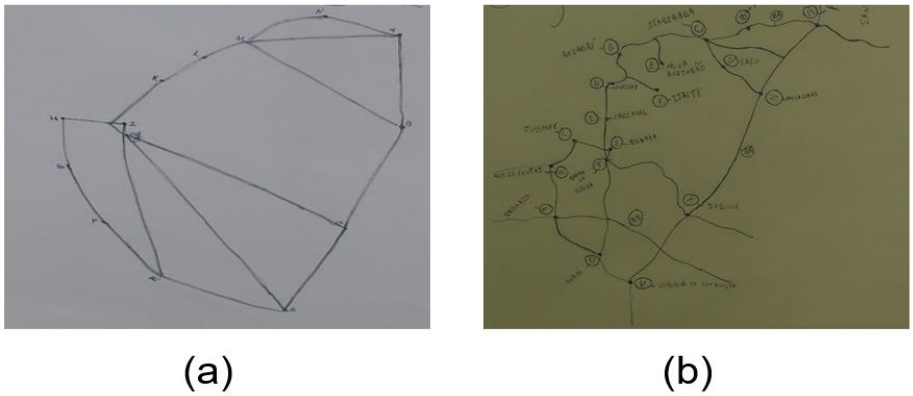
Ainda sobre este problema, um estudante descreveu a sequência que fez e de imediato surgiu a discussão "como adivinhar a sequência correta?", e em meio ao diálogo com a turma o próprio percebeu que havia dicas (estratégias) na apostila que poderia ajudar. Foi discutido ainda que os desafios apresentados, tanto o das pontes de Konigsberg, quanto da "casa" e o do retângulo são problemas típicos da Teoria dos Grafos e a natureza das ideias tanto desses desafios quanto de suas resoluções alicerçam outros problemas com o grau de complexidade maior.

Retomamos o terceiro encontro resgatando as estratégias apresentadas e formalizando alguns conceitos da Teoria dos Grafos, como: Grafo, vértice, arestas, grau, caminho, ciclo e resultados da Teoria (teoremas) que garante às utilizações de estratégias para solucionar os problemas dessa natureza. A sequência didática admitida entende que o jogo é um instrumento rico para aprendizagem dos conceitos matemáticos e favorece a construção de um ambiente lúdico e interativo. (GONÇALVES, 2007).

Com a finalização da discussão sobre os conceitos, iniciou-se a apresentação do último problema da oficina constante na apostila: utilizando o mapa (Ver Figura 6) escolha pelo menos cinco cidades e a partir das estradas mostradas trace um grafo para elas. Nesta atividade os estudantes tiveram a liberdade de construir suas soluções com a extensão que desejassem, esta etapa foi a todo momento supervisionada e orientada. Constatou-se que a maioria dos alunos construíram uma estrutura lógica do pensamento para resolução do problema, demonstrando a internalização dos conceitos e dos procedimentos necessários para o desenvolvimento autônomo da solução.

A conclusão e socialização da oficina ocorreu no quarto encontro com a finalização da construção do grafo relacionado as rodovias da Figura 6, expondo e apresentando (Ver Figura 9). Apresentação das soluções mostrou aos alunos que mesmo uma área do conhecimento exata pode admitir problemas com inúmeras soluções e todas satisfatórias, e como destaca Luckesi (2005) sem a necessidade de haver uma solução melhor que outra.

**Figura 9.** Grafos construídos pelos estudantes ao final da oficina




**Fonte**: Elaboração dos autores

Percebemos que a construção do grafo representativo da solução do problema e a apropriação dos novos conceitos esteve amparado em significados já existentes na base conceitual dos estudantes. Isso nos mostra que a estruturação e desenvolvimento do raciocínio lógico deve partir do conhecimento prévio dos estudantes e se possível de elementos coletivamente conhecidos.

## Considerações finais

Discutimos aqui neste texto o desenrolar de uma oficina que teve intuito de dar subsídios para discutir sobre "quais aspectos e como a utilização de jogos grafos podem contribuir para o desenvolvimento do raciocínio lógico de estudantes" considerando suas potencialidades e limitações para a estruturação do pensamento.

Utilizar os jogos como um instrumento didático para introduzir alguns conceitos matemáticos associados à Teoria dos Grafos é uma ruptura na dinâmica das aulas, como também no conteúdo programático, haja vista a necessidade de respeitar o tempo pedagógico dos alunos e o constrangimento do tempo cronológico junto à atividade curricular.

A partir das observações e registros coletados durante a dinâmica experimentada nos encontros da oficina pudemos observar as várias possibilidades de construir um ambiente de aprendizagem matemática com o auxílio dos jogos. No sentido da Teoria dos Grafos, mesmo não sendo um conteúdo curricular na educação básica, é perceptível a

potencialidade que seus conceitos têm em aproximar a Matemática a rede de significados dos estudantes.

Entender como e quais aspectos uma prática pedagógica associada à Teoria dos Grafos pode colaborar no desenvolvimento do raciocínio lógico, considerando as análises feitas na oficina, é perceber de que forma e em que perspectiva seu planejamento e sua condução deve ser pautada para construir habilidades de sistematização do pensamento, capacidade investigativa, elaboração de estratégias de resolução, colaboração, interação e autonomia, apoiando-se nas inúmeras aplicações da Teoria dos Grafos nas outras áreas de conhecimento.

Deste modo, entendemos que as habilidades citadas podem ser favorecidas numa proposta que estruture o convite da atividade numa perspectiva significativa para os estudantes; defina as regras do desenvolvimento da atividade; organize grupos de trabalho e pesquisa; incentive a autonomia de consulta e pesquisa fazendo uso de múltiplas fontes, celulares, tablet, livros; mantenha a motivação e engajamento dos alunos no desenvolvimento da atividade; reconheça as potencialidades dos grupos e socialize os resultados coletivamente.

De modo geral, os resultados da oficina foram alcançados no sentido que a compreensão e internalização dos conceitos apresentados nos desafios durante os encontros da oficina, foram discutidos, questionados e socializados pelos estudantes potencializando o seu desenvolvimento quanto a organização e autonomia do pensamento. Por fim, acreditamos que as interrogações apresentadas no início desse texto, produziram análises e discussões que identificam contribuições na formação do raciocínio lógico por meio dos jogos grafos.

## Referências

BARABÁSI, A. L. **Network Science**. 1. ed. [S. l.]: Northeastern University, 2015. Disponível em: <http://networksciencebook.com/>.Acesso em: 25 jan. 2023.

BARBIER, R. **A pesquisa-ação.** Brásilia: Liber Livro Editora, 2004.

BASTAZINI, S. P.; MORI, N. N. R. **RACIOCÍNIO LÓGICO E PENSAMENTO: UM ESTUDO EM SALA DE RECURSOS MULTIFUNCIONAL TIPO I**. 2014. Disponível em: <http://www.diaadiaeducacao.pr.gov.br/portals/cadernospde/pdebusca/producoes_pde/2

014/2014_uem_edespecial_artigo_silvana_pascutti_bastazini.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2023.

BERLEKAMP, E. R.; CONWAY, J. H.; GUY, R. K. **Winning ways for your mathematical plays**. 2. ed. Wellesley, Massachusetts, USA: Sales e customer service office, 2001. 297 p. v. 1. ISBN 1-56881-130-6.

BORIN, J. **Jogos e resolução de problemas**: uma estratégia para as aulas de matemática. São Paulo: IME-USP, 1996.

FLESCH, B.; PRADHAN, A. Graph Nim. **Pure Insights**, Monmouth, Oregon, v. 4. Artigo 3. 2015. Disponível em: <https://digitalcommons.wou.edu/pure/vol4/iss1/3/>. Acesso em 10 fev. 2023.

FUKUYAMA, M. A Nim game played on graphs. **Theoretical Computer Science**, 2003a. p. 387 – 399.

FUKUYAMA, M. A Nim game played on graphs II. **Theoretical Computer Science**, 2003b. p. 401–419.

GONÇALVES, A. L. **Grafos**: Aplicações ao Jogo. Orientador: Antônio Pascoal. 2007. 98 p. Dissertação (Mestre) - Universidade Portucalense, Porto, 2007. Disponível em: <http://www.prof-lori-viali.com/graduacao/po_2/literatura/grafos/dissertacoes/TMMAT%20102.pdf.> Acesso em: 10 jan. 2023.

LAPASSADE, G. **As Microssociologias**. Brasília: Liber Livro Editora, 2005.

LUCKESI, C. C. **Avaliação da Aprendizagem Escolar**: estudos e proposições. 17. ed. São Paulo: Cortez, 2005.

MACEDO, R. S. **Etnopesquisa crítica, etnopesquisa-formação.** Brasília: Líber Livro Editora, 2006.

MORAES, C. R.; VARELA, S. **MOTIVAÇÃO DO ALUNO DURANTE O PROCESSO DE ENSINOAPRENDIZAGEM**. 2007. Disponível em: https://web.unifil.br/docs/revista_eletronica/educacao/Artigo_06.pdf. Acesso em: 10 jan. 2023.

NETTO, P. O. B. **Grafos**: Teoria, Modelos e Algoritmos. São Paulo – SP. 4. ed. 2006. 328 p. ISBN 9788521203919.

NEWMAN, M. E. J. The Structure and Function of Complex Networks**. Society for Industrial and Applied Mathematics**. 2003. v. 45. p. 167–256.

OSTROSKI, A. MENONCINI, L. Teoria dos Grafos e Aplicações. **Synergismus scyentifica UTFPR**. v. 4. Pato Branco – PR. 2009. Disponível em:

<http://revistas.utfpr.edu.br/pb/index.php/SysScy/article/viewFile/709/465>. Acesso em: 10 dez. 2022.

POLYA, George. (1995). **A arte de resolver problemas**: um novo aspecto do método matemático. Trad. Heitor Lisboa de Araújo. 2ª reimpressão. Rio de Janeiro.

RODRIGUES, H. O.; SILVA, J. R. **O jogo do Nim e os conceitos de MDC e MMC**. In: ENCONTRO NACIONAL DE EDUCAÇÃO MATEMÁTICA, VIII, Recife, 2004. Anais... Recife: SBEM, 2004. Minicurso. Disponível em: <http://www.sbem.com.br/files/viii/pdf/02/2MC06193102434.pdf>. Acesso em: 5 dez. 2022.

SEARA, H. F. A **Compreensão de Conceitos Matemáticos Através de Desafios e Situações-Problema**. In: X EPREM- Encontro Paranaense de Educação Matemática, 2009, Guarapuava. A Educação Matemática no Paraná - 20 anos - Avanços, Desafios e Perspectivas. Guarapuava: UNICENTRO, 2009. p. 886-892.

SIEGEL, A. N. **Combinatorial Game Theory.** San Francisco, CALIFORNIA: American Mathematical Society, 2013. 523 p. v. 146. ISBN 978-0-8218-5190-6.

TEIXEIRA, R. R. P.; SANTOS, K. R. **Jogos em sala de aula e seus benefícios para a aprendizagem da matemática**. Revista Linhas, Florianópolis, v. 15, n. 28, p. 302-323, jan./jun. 2014. Disponível em: <https://revistas.udesc.br/index.php/linhas/article/view/1984723815282014302/3103>. Acesso em: 01 mar. 2023.

VULCANI, R. L. M. **Grafos eulerianos e suas aplicações**. Orientador: Celia Picinin de Mello. 2015. 82 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2015. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/306826/1/Vulcani_RenatadeLacerdaMartins_M.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2023.

***Recebido em***: 19 / 03 / 2023
***Aprovado em***: 31 / 05 / 2023

Artigo

ELO Diálogos em Extensão

DOI 10.21284/elo.v13i.16785

PEC PRÓ-REITORIA DE EXTENSÃO E CULTURA

UFV Universidade Federal de Viçosa

www.periodicos.ufv.br/elo
elo@ufv.br
ISSN: 2317-5451

# Extensão e pesquisa para promoção e sustentabilidade da agricultura familiar no município de Conceição da Feira - Ba

*Rogério Gomes Matias[1], Thiago Pires Santana[2], Ianca Rodrigues Costa[3], Aloísio Machado da Silva filho[4], Rui Manuel Teixeira Santos Dias[5], Gilney Figueira Zebende[6]*

**Resumo:** *Este artigo descreve, no âmbito da pesquisa e extensão universitária, as ações desenvolvidas na associação rural de moradores e agricultores do Cruzeiro, Tábua, Timbó e Adjacências situada na região de Conceição da Feira, Bahia-Brasil. A proposta de trabalho foi discutir economia, agricultura familiar, formação e capacitação nesta associação. A agricultura familiar desempenha um papel essencial nas pequenas comunidades rurais, colaborando e promovendo o desenvolvimento sustentável, a geração de renda e a segurança alimentar. Partir deste entendimento e neste cenário, desenvolvemos na associação rural rodas de conversa para discutir economia, agricultura familiar, formação e capacitação. As rodas de conversa foram estruturadas em dois encontros, almejando promover e fortalecer a agricultura familiar dessa localidade. Identificamos que a comunidade da associação rural não é autossuficiente e não está inserida diretamente na produção avícola, que é o principal vetor econômico da região. Porém, existe interesse da comunidade em capacitar-se por meio atividades presenciais e inserir-se nesse nicho econômico. Identificamos que, para alcançar o desenvolvimento sustentável é necessário a colaboração de instituições públicas e privadas que possam apoiar a comunidade na superação de suas necessidades.*

**Palavras-chave:** *Desenvolvimento sustentável. Agricultura familiar. Formação.*

**Área Temática:** *Ruralidade.*

## *Extension and research for the promotion and sustainability of family farming in the municipality of Conceição da Feira - Ba*

**Abstract:** *This article describes, within the scope of research and university extension, the actions developed in the rural association of residents and farmers of Cruzeiro, Tábua, Timbó and Adjacencies located in the region of Conceição da Feira, Bahia-Brazil. The proposal aims to discuss the economy, family farming and training in this association. Family farming plays an essential role in small rural communities, collaborating and promoting sustainable development, income generation and food security. From this comprehension and this scenario, we developed discussion groups in the rural association to discuss economics, family farming, and training. The discussion groups were structured in two meetings expecting to promote and strengthen family farming in that location. We identified that the rural association community is not self-sufficient and is not directly involved in poultry production, which is the relevant economic vector in*

[1] Professor da Universidade Estadual de Feira de Santana. Mestre em Computação Aplicada. E-mail: rgmatias@uefs.br
[2] Professor da Universidade Estadual de Feira de Santana. Doutorando em Ciências Ambientais.
[3] Economista formada pela Universidade Estadual de Feira de Santana.
[4] Professor da Universidade Estadual de Feira de Santana. Pós Doutor em Econofísica.
[5] Professor do Instituto Politécnico de Setúbal. Doutor em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial.
[6] Professor da Universidade Estadual de Feira de Santana. Doutor em Física.

*the region. However, there is an interest in training through face-to-face activities and entering this economic niche. We identified that for sustainable development, public and private institution collaboration is necessary to support the community in overcoming its needs for sustainable development.*

**Keywords:** *Sustainable development. Family farming. Training.*

## *Extensión e investigación para la promoción y sustentabilidad de la agricultura familiar en el municipio de Conceição da Feira - Ba*

**Resumen:** *Este artículo describe, en el ámbito de la investigación y la extensión universitaria, las acciones desarrolladas en la asociación rural de residentes y agricultores de Cruzeiro, Tábua, Timbó y Adjacências situadas en la región de Conceição da Feira, Bahía-Brasil. La propuesta de trabajo fue discutir sobre economía, agricultura familiar, formación y capacitación en esta asociación. La agricultura familiar desempeña un papel esencial en las pequeñas comunidades rurales, colaborando y promoviendo el desarrollo sustentable, la generación de ingresos y la seguridad alimentaria. A partir de este entendimiento y en este escenario, desarrollamos en la asociación rural grupos de discusión para discutir sobre economía, agricultura familiar, formación y capacitación. Los grupos de discusión fueron estructurados en dos encuentros, anhelando promover y fortalecer la agricultura familiar de esa localidad. Identificamos que la comunidad de la asociación rural no es autosuficiente y no está inserta directamente en la producción avícola, que es el principal vector económico de la región. Sin embargo, existe interes en capacitarse por medio de actividades presenciales e inserirse en este nicho económico. Identificamos que, para alcanzar el desarrollo sustentable es necesario la colaboración de instituciones públicas y privadas que puedan apoyar a la comunidad en la superación de sus necesidades.*

**Palabras clave:** *Desarrollo sustentable. Agricultura familiar. Formación.*

## INTRODUÇÃO

Historicamente, o Brasil possui destaque no cenário mundial na produção de *commodities* agropecuárias e nos últimos anos a tecnologia e a globalização vem mudando o processo de produção, exportação e consumo de alimentos (Pessoa *et al.*, 2021). No território nacional, a área destinada às atividades do setor agropecuário corresponde a 31% da extensão do país. Essa estatística é significativamente expressiva haja vista que 60% correspondem a florestas, 2% a corpos d'água, 6% a formação natural não florestal e 1% a área não vegetada (área urbanizada, praias, dunas e mineração) (MAPBIOMAS, 2023). Apesar de seu desenvolvimento e importância socioeconômica nem sempre o PIB do setor agropecuário apresenta taxas anuais positivas, destacando-se na sua composição a produção de soja, milho, cana-de-açúcar, galináceos e bovinos (IBGE, 2022a, 2022c).

O estado da Bahia possui 41% do seu território comprometido com atividade agropecuária (MAPBIOMAS, 2023) e sua participação na economia representa aproximadamente 12,6% do PIB do estado em relação à indústria 24,2% e, ao serviço, 63,2% (COEST/SEI, 2023). Em comparação aos índices do Brasil podemos afirmar que, em termos percentuais, a Bahia destina uma área maior para o setor, porém a sua participação no PIB é tímida. Estes índices indicam baixa produtividade por área, explicada possivelmente por fatores climáticos, dificuldades de manejo e modernização no processo de produção, em especial, quando nos referimos à agricultura familiar. Notadamente, as *commodities* mais produzidas no Brasil e na Bahia (milho, soja, algodão, cana-de-açúcar e boi) são amplamente analisadas em estudos econômicos de interdependência de mercado (Santana *et al.*, 2023a).

A Figura 01a exibe um mapa com a distribuição regional da produção econômica baiana no que se refere aos setores agropecuário, indústria e serviço. Nela, nota-se próxima à capital (Salvador), uma concentração do

setor industrial e de serviços. No centro-oeste há uma concentração do setor agropecuário e do setor de serviços distribuído de forma mais equitativa no estado. Acreditamos que a distribuição do setor de serviços no estado se dá diante das demandas oriundas da indústria e agropecuária ao longo do território.

Nota-se na Figura 01b, eixo esquerdo, que em valores absolutos a área destinada à atividade agropecuária cresce exponencialmente ao longo dos anos, tendendo estabilidade a partir de 2018. Em termos percentuais, tem-se que em 1997 e 2020 houve uma pequena redução na área destinada ao setor, o que está relacionado a crise climática e a pandemia da COVID-19, respectivamente. Inúmeros estudos têm identificado a influência da COVID-19 na economia global (Chakrabarti; Jawed; Sarkhel, 2021; Just M., 2022; Santana *et al.*, 2023b; Wang; Yang; Li, 2022).

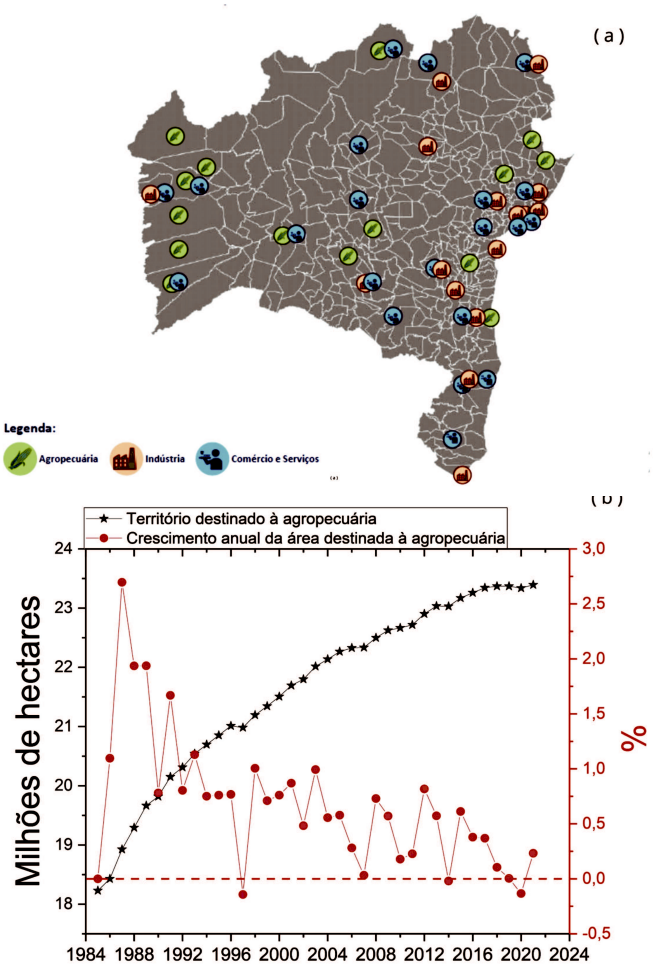



Figura 01 – Em (a) é apresenta a distribuição geográfica da produção econômica no estado da Bahia, Brasil. Em (b) tem o crescimento da área destinada ao setor agropecuário no estado da Bahia, Brasil.

Fonte: IBGE e MAPBIOMAS.

Acompanhando a tendência da produção nacional, a Bahia tem como principais *commodities* soja, algodão e milho e os maiores rebanhos são de galináceos, bovinos e caprinos, respectivamente. Os maiores rebanhos de galináceos, por exemplo, se encontram na região de Luís Eduardo Magalhães e na região econômica do Paraguaçu, especificamente, nas cidades de Feira de Santana, Conceição da Feira e São Gonçalo dos Campos (COEST/SEI, 2023).

Conceição da Feira é notadamente um dos polos avícolas da Bahia, concentrado junto com Feira de Santana e São Gonçalo dos Campos inúmeras empresas produtoras e beneficiadoras de frango. O desenvolvimento econômico regional associado à produção avícola movimenta outros setores da economia para atender as demandas da cadeia produtiva proporcionando geração de emprego, renda, arrecadação de tributos etc. Segundo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022b) a cidade de Conceição da Feira possui uma população estimada de 20.800 habitantes e uma extensão territorial de aproximadamente 165 km² localizado na região da Mata Atlântica.

No contexto apresentado acima, foi estruturada uma atividade colaborativa entre o Programa de Pós-graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente (PPGM) da Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS) e o projeto de extensão "Tópicos de Matemática Aplicada e sua interface nas diversas áreas do conhecimento para a promoção da cidadania e tomada de decisão através de ações extensionistas voltadas para comunidade da UEFS e seu entorno7[7]" coordenado pela área de matemática aplicada da própria universidade.

Esta colaboração integrou resultados de pesquisas do PPGM as práticas do projeto de extensão com o objetivo de discutir economia, agricultura familiar, formação e capacitação na Associação Rural de Moradores e Agricultores do Cruzeiro, Tábua, Timbó e Adjacências em Conceição da Feira, Bahia. A referida associação está localizada no distrito do Cruzeiro (Tábua e Timbó são regiões próximas, mas não são reconhecidos como distritos), possui cerca de 200 associados cadastrados, porém a maioria não participa ativamente das atividades da associação. Em geral, os membros da associação são caracterizados por trabalharem e/ou residirem nas três comunidades e em sua maioria são agricultores individuais, proprietários de terras e outros profissionais relacionados ao setor.

O plano de ação pretendeu, no momento de sua elaboração e desenvolvimento, aproximar a comunidade regional à Universidade Estadual de Feira de Santana, apresentando suas atividades e abrindo suas portas para o desenvolvimento regional e novas parcerias. Ressaltamos que, o referido projeto de extensão, apresenta como objetivo formal contribuir para o desenvolvimento social, pessoal, profissional e da comunidade universitária da cidade de Feira de Santana e seu entorno por meio de diversas ações envolvendo a Matemática Aplicada (Matias; Santana, 2021).

[7] Algumas ações desenvolvidas de forma colaborativa pelo projeto de extensão podem ser identificadas em Santana, Matias e Santana (2023), Matias e Santana (2021).

A ação de intervenção colaborativa foi desenvolvida em um ambiente que tem intenção de organizar produtores rurais locais para conseguir melhores condições de gerenciamento coletivo, solução de problemas comuns e cooperação governamental, viabilizando a produção, sustentabilidade e agricultura familiar. Chamamos de agricultura familiar um sistema de produção em que há relação de parentesco entre trabalhadores, proprietários e gerenciadores (Silochi; Lima; Oliveira, 2015). Do mesmo modo, nos referimos a sustentabilidade como a relação e equidade entre desenvolvimento econômico, social e ambiental, ou seja, devemos "viver hoje se quisermos um amanhã melhor, satisfazendo as necessidades presentes sem comprometer as possibilidades de as gerações futuras satisfazerem as suas necessidades" (UN, 2023).

## OBJETIVOS

### Objetivo geral

Discutir economia, agricultura familiar, formação e capacitação na Associação rural de moradores e agricultores do Cruzeiro, Tábua, Timbó e Adjacências situada na região de Conceição da Feira, Bahia-Brasil.

### Objetivos específicos:

- Promover uma roda de conversa sobre os aspectos econômicos da Bahia em relação aos grandes setores (agropecuária, indústria e serviço);
- Caracterizar a economia local situando a agricultura familiar;
- Apresentar a relação entre produtividade e capacitação;
- Identificar as principais demandas de interesse da comunidade;
- Mostrar canais de acesso a formação e capacitação disponibilizados gratuitamente por instituições especializadas.

## METODOLOGIA

A pesquisa se caracteriza por ser de natureza aplicada e qualiquantitativa, pois sua finalidade é contribuir para o desenvolvimento local e se vale de técnicas qualitativas e quantitativas para obter e analisar os resultados. Em relação aos objetivos, a pesquisa se enquadra como exploratória e descritiva, haja vista o trabalho em um campo ainda não explorado que necessita de caracterização e identificação das necessidades e estruturação do plano de intervenção (Marconi; Lakatos, 2009; Medeiros, 2009). Quanto aos procedimentos metodológicos, admitimos atributos de uma pesquisa-ação, dado que neste tipo de pesquisa existe a intenção de transformar a realidade e produzir conhecimento associado às intervenções (Barbier, 2004). Os procedimentos metodológicos serão apresentados segundo as etapas desenvolvidas, a saber: planejamento e acesso ao campo, primeira intervenção, planejamento e segunda intervenção.

Na primeira etapa foi construído coletivamente (entre estudantes e professores do PPGM e Projeto de extensão) um plano de trabalho que buscou inicialmente discutir com a sociedade os aspectos socioeconômicos

da Bahia e da região de identidade do Portal do Sertão, bem como do município de Conceição da Feira[8], a respeito da agricultura familiar e a relação de produtividade e capacitação. A inserção ao campo se deu por meio de um dos participantes e autores (estudante de economia) residente no município de Conceição da Feira, que buscou os representantes da associação para apresentar proposta, identificar as características da associação que ajudasse a estruturar de forma mais incisiva o plano de trabalho e atender algumas necessidades da comunidade.

No primeiro encontro foi desenvolvida uma roda de conversa com os membros da associação com os objetivos de apresentar e envolver os presentes na proposta (convite a participação), mostrar e discutir a produção agropecuária na Bahia e arredores de Conceição da Feira (ver Figura 01), ressaltar a importância da agricultura familiar na economia e sustentabilidade e, ao fim, mostrar a relação entre capacitação e produtividade culminando com a apresentação de cursos gratuitos em plataformas *onlines*. Este primeiro encontro foi planejado para ser executado em torno de duas horas.

O segundo encontro foi planejado a partir das impressões identificadas no primeiro encontro e executada aproximadamente três meses após o primeiro. Também planejado para a duração de duas horas, o segundo encontro teve como objetivos retomar a discussão sobre economia baiana apresentando as séries de índice de preço das *commodities* agropecuárias, verificar como ocorreu a participação dos associados presentes nos cursos apresentados no primeiro encontro e avaliação das rodas de conversa. Quanto as duas últimas intenções deste encontro, foi aplicado um questionário para viabilizar a identificação, organização e análise das informações, como pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1 – Questionário.

| | |
|---|---|
| Pergunta 1 | Qual a sua principal produção? |
| Pergunta 2 | Sua renda vem dessa produção? |
| Pergunta 3 | Você conhece a importância da produção agropecuária da sua região? |
| Pergunta 4 | Você participou de algum curso oferecido pela EMBRAPAou outra instituição? |
| Pergunta 5 | Dos cursos citados, qual o que mais lhe interessou? |
| Pergunta 6 | Quais outros cursos você possui interesse em participar? |
| Pergunta 7 | Qual a importância da roda de conversa realizada? |
| Pergunta 8 | A roda de conversa trouxe informações que não conheciam? |

Fonte: Elaboração própria.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Diante das ações desenvolvidas pelo Programa de pós graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente e pelo Projeto de extensão Tópicos de Matemática Aplicada e sua interface nas diversas áreas do

[8] https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ba/conceicao-da-feira/panorama
[9] EMBRAPA: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Informações adicionais disponível em https://www.embrapa.br/.

conhecimento para a promoção da cidadania e tomada de decisão através de ações extensionistas voltadas para comunidade da UEFS e seu entorno com a comunidade rural do Cruzeiro, Tábua, Timbó e Adjacências, obtivemos e compartilhamos informações, que sustenta o embasamento teórico e metodológico da pesquisa-ação realizada.

## *Primeiro encontro*

A roda de conversa foi realizada, como já mencionada, em dois momentos. O primeiro encontro iniciou com a acolhida dos associados; exposição, por parte do diretor da associação, dos trabalhos desenvolvidos pela associação rural no ano de 2023, demandas da comunidade e apresentação da nossa equipe de trabalho nesse contexto. Nossa atividade foi introduzida com a apresentação da proposta e convite à participação, buscando durante esse processo favorecer a comunicação e motivá-los ao desenvolvimento da roda de conversa. o convite à participação é um dos principais momentos da atividade. É nele em que os integrantes são motivados a participar do processo de desenvolvimento da proposta, incitando a uma conduta positiva que deixe claro a importância da ação e de sua participação (Lourenço; Paiva, 2010; Santana; Matias; Santana, 2023).

A receptividade e adesão dos associados foi notável, demonstrando interesse e curiosidade em relação à proposta e participação. Durante a apresentação inicial, enfatizamos a importância de se discutir a temática acerca da economia regional, agricultura familiar, produtividade e capacitação, destacando que tais tópicos possuem uma grande relevância para o desenvolvimento da comunidade. Essa abordagem buscou fornecer aos associados, conhecimento sobre as potencialidades da região a qual pertencem, favorecendo um contexto adequado para as discussões subsequentes sobre o setor agropecuário.

Após contextualização, passamos para a apresentação dos dados da produção agropecuária nos anos últimos anos, tanto a nível nacional, quanto em nível baiano e regional, destacando as principais *commodities*: soja, milho, carne bovina, leite, frango, cana-de-açúcar e suínos. Através de gráficos, mapas e tabelas, ilustramos o impacto significativo desse setor na economia do país, do estado da Bahia e da região do município de Conceição da Feira.

No primeiro encontro o ápice da interação na roda de conversa iniciou com a discussão sobre a importância do desenvolvimento da agricultura familiar nas comunidades rurais e exposição das estatísticas como o censo agropecuário de 2017 que aponta que aproximadamente 77% dos estabelecimentos analisados, a nível nacional, desenvolvem uma dinâmica de atividade rural familiar, sendo uma modalidade da agropecuária que apresentou mais de 10 milhões de pessoas ocupadas com essa prática, movimentando cerca de 107 bilhões de reais. Em termos percentuais, isso significa que a agricultura familiar foi responsável por cerca de 23% das cifras monetárias de toda produção agrícola do país (IBGE, 2017).

Foi possível perceber que os participantes reconheceram o quão a agropecuária contribui economicamente para o desenvolvimento do país, sobretudo, nas comunidades locais. Além disso, enfatizamos que a agricultura familiar não apenas preserva tradições culturais, mas também desempenha um papel vital na segurança alimentar da população, contribui para a sustentabilidade ambiental e o fortalecimento das comunidades rurais através do estímulo ao cooperativismo e ao associativismo entre os pequenos produtores.

Encerrado a conversa sobre a importância da agricultura familiar, abordamos a relação entre capacitação e produtividade e de que forma elas contribuem para o desenvolvimento pessoal e coletivo. Demonstramos como a participação em cursos de formação podem aprimorar as práticas agrícolas, aumentando a eficiência da produção e, consequentemente, melhorando a renda e a qualidade de vida dos agricultores familiares. Estendemos a roda de conversa para além do programado, inicialmente, para apresentarmos e sugerirmos a participação nos diversos cursos gratuitos (agricultura, pecuária, avicultura, fruticultura) oferecidos por instituições, a exemplo da EMBRAPA, como uma maneira de equipar os agricultores com habilidades e conhecimentos para um melhor manejo no campo ou início de um novo.

## *Segundo encontro*

Após aproximadamente três meses do primeiro encontro, retornamos à comunidade rural para realizarmos o segundo. Esse encontro teve por finalidade retomar a discussão sobre economia baiana apresentando as séries de índice de preço de algumas *commodities* agropecuárias, verificar a participação dos associados nos cursos apresentados e avaliação da roda de conversa, ou seja, verificamos o quão as perspectivas e experiências dos associados tinham avançado, quanto a capacitação e a produtividade, em decorrência da roda de conversa e da realização dos cursos ao longo dos quase três meses do primeiro contato. Iniciamos o segundo momento, apresentando sua finalidade e sondando por meio de uma breve conversa as impressões que os membros da associação tiveram ao realizarem os cursos.

Fizemos essa verificação por meio da aplicação de um questionário, a fim de dimensionar o comportamento e as necessidades dessa comunidade rural dentro da região agrícola a que pertence. As perguntas, cuidadosamente elaboradas, buscaram entender melhor suas principais atividades, o poder da renda que elas geram, a importância da produção agrícola na região, o envolvimento prévio em capacitações e seus interesses em aperfeiçoamentos futuros.

O questionário aplicado forneceu informações que estão representadas e distribuídas de forma gráfica ou em termos percentuais a seguir que discutiremos de acordo com a ordem de cada uma das oito perguntas propostas no questionário.

*Pergunta 1: Qual a sua principal produção?*

Essa pergunta revelou informações importantes sobre as atividades predominantes dos associados. Os resultados apresentados na Figura 02, destacam que a maioria (40%) possui a principal produção relacionada à agricultura, realçando a importância crucial dessa atividade para a sustentabilidade e segurança alimentar da comunidade. Além disso, outras áreas também se mostraram relevantes, incluindo pecuária[10] (9,1%), suinocultura

[10] Consideramos neste texto a pecuária apenas como a atividade da criação de gado.

(9,1%), avicultura (12,7%), hortaliças (21,8%), fruticultura (1,8%) e outros setores (5,5%). A diversidade de respostas reflete a riqueza das atividades econômicas na região, contribuindo para uma caracterização completa da economia local.

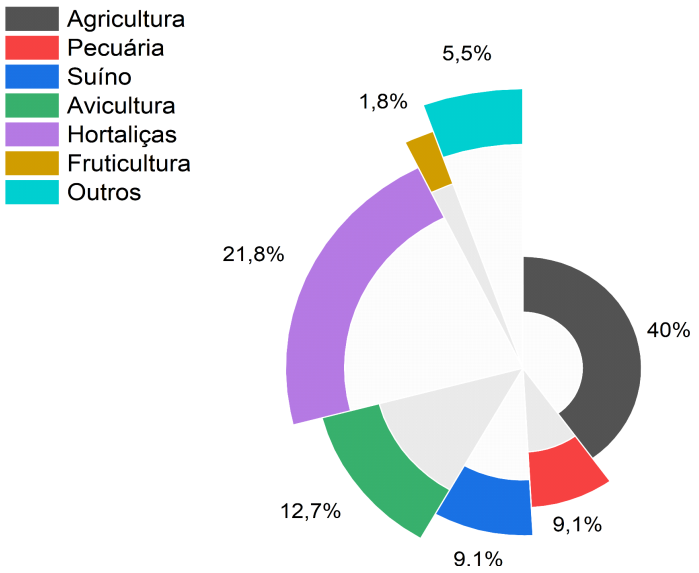



Figura 02 – Principal produção dos associados da comunidade.
Fonte: Elaboração própria.

Os dados indicam que, apesar da região ser um polo avícola, a produção dessa comunidade não é exclusivamente voltada para esse nicho econômico, mas sim para uma cadeia complementar com característica de subsistência. O que também exclui a comunidade da principal matriz econômica da região.

*Pergunta 2: Sua renda vem dessa produção?*

Os resultados desta pergunta demonstraram que a produção agrícola divide um papel importante na geração de renda para muitos associados, 15 dos 35 participantes (42,9%) indicaram que sua renda está diretamente relacionada a essa produção, reforçando o impacto da agricultura familiar não só de maneira de subsistência para a comunidade, mas com uma relevância econômica importante.

Os demais membros da associação de agricultores e moradores dessa comunidade indicaram que sua renda tem origem em programas de assistência social do governo ou são aposentados pelo Instituto Nacional de Seguro Social (INSS), ou são prestadores de serviços autônomos. O afastamento de parte dos associados (20 de 35) da principal matriz econômica da região pode explicar a necessidade de muitos trabalhadores terem sua principal renda vinculada a programas de assistência social.

Essa proporção nos mostra o quanto a agropecuária regional tem para se desenvolver, haja vista que os associados não são autossuficientes e necessitam de programas de assistência social para completar a renda. Devido ao potencial agropecuário da região pouco explorado, percebemos que os jovens não se motivam a investir nessa área de trabalho, percebemos isso pela alta faixa etária dos associados.

*Pergunta 3: Você conhece a importância da produção agropecuária da sua região?*

A quase totalidade dos participantes (34 dos 35) afirmou ter conhecimento sobre a relevância da produção agrícola em sua região. Esse dado ressalta a conscientização dos associados sobre os impactos econômicos, sociais, ambientais e culturais do desenvolvimento dessa atividade em suas vidas e de seus familiares. Esse entendimento os favorece assumir um papel, não só de pertencimento, mas de indivíduos que colaboram com o crescimento de toda uma região de identidade agrícola, sobretudo, quando se organizam enquanto associação rural nesse cenário.

No contexto da produção agropecuária do estado baiano e correlacionando essencialmente com a diversidade das divisões territoriais de identidade agrícola de todo estado, os associados percebem que sua comunidade, bem como todo o município, compõe parte de uma estrutura socioeconômica fortalecida. Esse entendimento é reforçado e/ou construído a partir das reflexões geradas em ações como a roda de conversa promovida.

Os dados observados fornecem uma base para entender a dinâmica econômica local e o papel central da agropecuária na vida desses associados e sinalizam que existe a necessidade de ações que auxiliem a inserção deles na cadeia produtiva. As próximas perguntas do questionário exploram a participação prévia em cursos de capacitação, as preferências por tópicos específicos de formação e a avaliação da roda de conversa como um todo.

*Pergunta 4: Você participou de algum curso oferecido pela EMBRAPA ou outra instituição?*

Os resultados dessa pergunta revelaram que uma minoria dos membros da associação (6 em 35) havia participado de cursos de manejo agrícola oferecidos pela EMBRAPA ou por outras instituições, cursos esses, apresentados e sugeridos no primeiro encontro da roda de conversa. Esse dado revela que apesar da existência de diversas formas de possibilidades de capacitação, há algumas barreiras que inviabilizam a participação, como por exemplo, a disponibilidade de tempo, a falta de acesso à internet e/ou a falta de habilidade com o manuseio de plataformas digitais. Alguns desses problemas surgem, sobretudo, em comunidades com pouca escolarização e que estejam distantes geograficamente dos centros urbanos.

Por outro lado, esses dados também ressaltam uma oportunidade significativa de aumentar o engajamento dos associados em programas de capacitação em formato necessariamente presencial, por meio de práticas desenvolvidas pelo setor público\privado, visando aprimorar suas habilidades, conhecimentos e fortalecimento enquanto grupo.

*Pergunta 5: Dos cursos citados, qual o que mais lhe interessou?*

A análise das respostas a essa pergunta forneceu *insights* valiosos sobre as preferências dos associados em relação aos tópicos de capacitação. Apesar da baixa adesão na participação dos cursos online, evidenciado pelas respostas coletadas na pergunta anterior, os associados demonstraram interesse na realização de capacitações, no entanto, considerando uma nova formatação no modelo presencial.

A Figura 03 demonstra os percentuais de interesse dos associados em desenvolver técnicas que aperfeiçoem a produção da agropecuária na comunidade rural. A capacitação em "galinhas caipiras" se destacou como o curso de maior interesse para 39,6% dos participantes, seguido por tópicos variados como "floricultura" (11,3%), "criação de suínos" (9,4%) e outros. Esses dados ajudaram a direcionar novas e futuras iniciativas de formação de acordo com as necessidades da comunidade, além de evidenciar o interesse em participar da cadeia avícola.

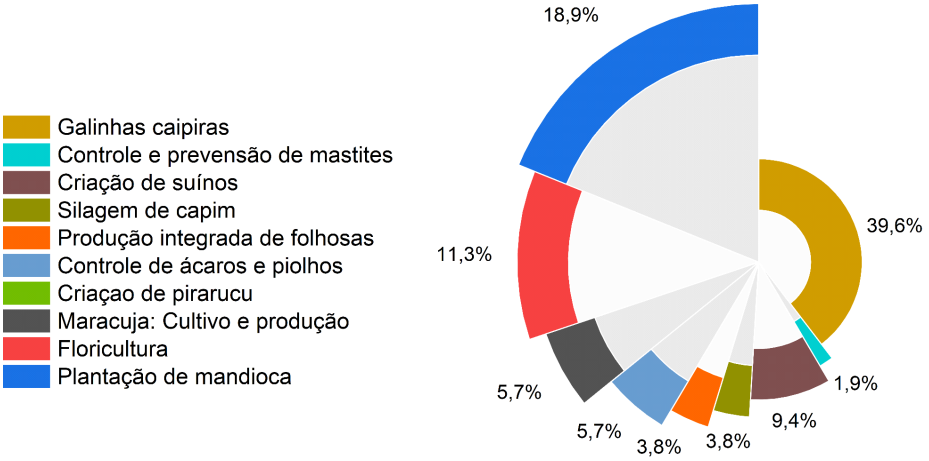



Figura 03 – Indicação dos cursos e capacitações de interesse da comunidade a partir de uma lista pré-estabelecida.
Fonte: Elaboração própria.

Os associados ainda mencionaram o desejo em cursos sobre o aproveitamento de resíduos orgânicos produzidos na própria comunidade, a exemplo de como fazer compostagem, visando a redução ou a não utilização de adubos e/ou fertilizantes químicos nas diversas culturas agrícolas desenvolvidas nessa localidade. Isso demonstra a preocupação dos associados com o meio ambiente o qual essa comunidade pertence, além de poder ser mais uma fonte de renda ou de economia para os associados. Esses diálogos geram reflexões que ratificam a importância do desenvolvimento de uma agricultura familiar forte diante do alcance dos impactos das diversas necessidades da sociedade.

*Pergunta 6: Quais outros cursos você possui interesse em participar?*

As respostas a essa pergunta revelaram uma variedade de interesses que não se limita apenas a formação do setor agropecuário, como o desejo em se especializar em "fruticultura", "palma", "plantação de mandioca", mas que perpassam essa área e voltam-se para novas direções, em qualificações de outros serviços como "manicure", "informática" e até "fabricação de ração". Estes anseios são descritos na nuvem de palavras da Figura 04. A pluralidade das informações presentes nas respostas da sexta questão, apresenta ainda o desejo de um dos associados em fazer um curso de ensino superior em arquitetura, o que mostra a magnitude das perspectivas dos associados dessa localidade quanto a capacitação.

Essa diversidade demonstra também a disposição coletiva da comunidade em adquirir conhecimentos em áreas diversas, fornecendo um panorama abrangente das necessidades de capacitação não atendidas até o momento. As respostas às perguntas 4, 5 e 6 destacam a importância de expandir as oportunidades de capacitação oferecidas à comunidade. Essa abordagem ampla pode não apenas enriquecer os conhecimentos dos associados, mas também contribuir para o desenvolvimento econômico e social da região.


Figura 04 - Outros cursos e capacitações sugeridos.
Fonte: Elaboração própria.

*Pergunta 7: Qual a importância da roda de conversa realizada?*

Essa pergunta teve o intuito de avaliar as rodas de conversa a partir das impressões dos associados. As avaliações fornecidas pelos participantes sobre a importância da roda de conversa foram expressas, pelos mesmos de forma positiva, com mais de 70% considerando-a como um momento "muito importante" e os outros quase 30% avaliando como "importante", ver Figura 05a.

Essas percepções refletem a significância da proposta de intervenção e indica que a iniciativa do programa de pós-graduação em parceria do projeto de extensão, conseguiu oferecer bons momentos de socialização de informações do cenário nacional, regional e local que atendessem as expectativas e aos interesses dos participantes.

*Pergunta 8: A roda de conversa trouxe informações que não conheciam?*

A avaliação sobre as informações trazidas pela roda de conversa mostrou que mais de 83% dos participantes aprenderam novos conhecimentos, essas informações estão representadas no gráfico da Figura 05b.

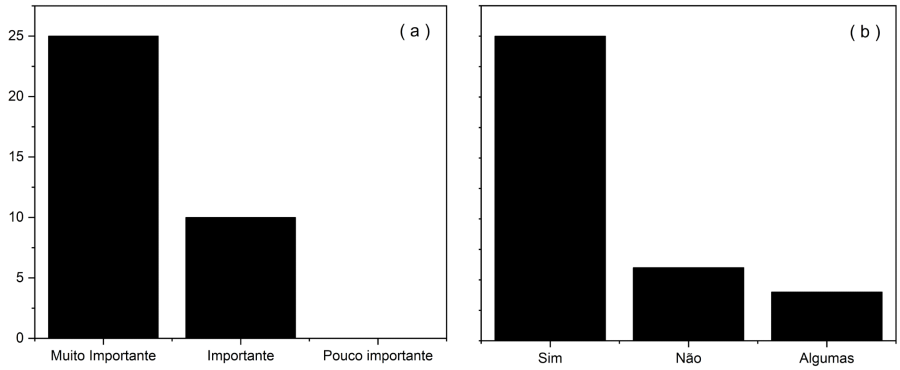



Figura 05 - Auto avaliação das atividades desenvolvidas.
Fonte: Elaboração própria.

A análise dessas respostas proporciona uma compreensão sobre a percepção dos associados em relação à roda de conversa e nos fornece um *feedback* valioso sobre os pontos fortes da iniciativa e aspectos que podem ser melhorados no futuro. Uma boa avaliação, além de motivar os associados a novas atividades, incentiva os proponentes a desenvolver novas ações na comunidade e fora dela.

## *Carta*

A partir da análise do primeiro encontro e no período entre eles, buscamos apoio na universidade e fora dela para desenvolver ações na comunidade voltadas à atividade agropecuária e educação ambiental no campo. Convidamos profissionais livres que atuam na área, grupos de trabalho com objetivos similares e contactamos a EMBRAPA, a fim de desenvolver práticas com o coletivo dessa associação, para o favorecimento e fortalecimento da produtividade atual e futura dessa comunidade.

Obtivemos retornos positivos em relação aos convites e solicitações realizadas, porém esbarramos em aspectos financeiros: custos de deslocamento, materiais necessários, disponibilidade de pessoal e alta demanda. Em outros casos, não obtivemos resposta.

Diante da movimentação realizada pelos envolvidos e para poder oportunizar e contribuir com o desenvolvimento da comunidade rural do Cruzeiro, Tábua, Timbó e adjacências, idealizamos a produção de uma carta aberta, em conjunto com os representantes da associação, conclamando empresas, instituições, grupos colaborativos, políticos e profissionais livres, para intermediar, oferecer capacitações e outras ações que beneficiassem a associação, sejam elas do setor público ou do setor privado. O documento foi elaborado e publicado nas redes sociais da associação, como também encaminhada, via endereço eletrônico (e-mail), para as diversas entidades e grupos com potenciais de ofertar ajuda.

A elaboração da carta pública deve-se também a nossa compreensão sobre as dificuldades da associação rural que, enquanto grupo, necessitam de medidas que favoreçam a implantação de políticas públicas para o fortalecimento, bem como maior inserção na economia local, autonomia e sustentabilidade. Como fruto dessa última mobilização, a associação obteve alguns retornos e logo após a publicação da carta houve a primeira formação com o curso presencial de compostagem.

## CONCLUSÕES

Discutimos no presente trabalho, o desenvolvimento de uma ação de pesquisa e extensão que teve como objetivo de discutir economia, agricultura familiar, formação e capacitação na Associação Rural de Moradores e Agricultores do Cruzeiro, Tábua, Timbó e Adjacências. Para isso, realizamos alguns encontros para apresentação da proposta e desenvolvimento, buscando durante o processo contribuir para o crescimento pessoal e profissional, sustentabilidade e autonomia da comunidade envolvida.

Durante os encontros, realizamos rodas de conversa contextualizando a produção econômica do estado da Bahia e Conceição da Feira e a inserção da agricultura familiar nesse cenário. Apresentamos o fortalecimento da agricultura familiar como forma de assegurar a autonomia e segurança alimentar. As discussões foram bastante positivas, haja vista que conseguimos fazer intervenções que promoveram a aprendizagem e mostraram deficiências a serem trabalhadas pela comunidade e órgãos governamentais.

Percebemos que mesmo com acesso à internet, especialmente pelos *smartphones*, houve pouca aderência na formação a partir de cursos online devido ao pouco letramento digital. A dificuldade apresentada por alguns associados ressalta a necessidade de oferecer capacitações presenciais. Além disso, a médio e longo prazo, é crucial implementar programas de desenvolvimento do letramento digital entre os associados de modo a capacitá-los a utilizar recursos em plataformas digitais.

Identificamos que a comunidade não é economicamente autossuficiente e grande parte depende de programas sociais para atender às suas necessidades básicas. Isso ressalta a importância de continuar buscando maneiras de fortalecer a economia local, proporcionar capacitação e criar oportunidades que reduzam a dependência desses programas promovendo, assim, um desenvolvimento mais sustentável e autônomo para a comunidade. Apesar de Conceição da Feira ser um polo avícola a comunidade da associação não está inserida nesse vetor econômico, mas existe motivação dos mesmos para participar das atividades avícolas da região.

Buscamos com a carta aberta apoio externo para a comunidade, pois ainda é necessário apoio aos associados para inserção na cadeia avícola. É fundamental que as entidades públicas e privadas considerem o apelo da carta e se envolvam em iniciativas que beneficiem a Associação Rural do Cruzeiro, Tábua, Timbó e Adjacências. Propostas futuras podem incluir a realização de cursos presenciais, programas de alfabetização digital e a busca contínua por parcerias e recursos para impulsionar o desenvolvimento sustentável da associação.

## AGRADECIMENTOS

Os autores do trabalho agradecem à Universidade Estadual de Feira de Santana. Agradecem também à Associação Rural de Moradores e Agricultores do Cruzeiro, Tábua, Timbó e Adjacências.

## REFERÊNCIAS

BARBIER, René. *A Pesquisa-ação*. 1. ed., Brasília: Liber, 2004. ISBN: 85-98843-01-6.]

CHAKRABARTI, Prasenjit; JAWED, Mohammad Shameem; SARKHEL, Manish. COVID-19 pandemic and global financial market interlinkages: a dynamic temporal network analysis. Applied economics, [S. l.], v. 53, n. 25, p. 2930–2945, 2021. ISSN: 0003-6846. DOI: 10.1080/00036846.2020.1870654.

COEST/SEI. Indicadores da Bahia. 2023. Disponível em: https://www.sei.ba.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=2192&Itemid=1042. Acesso em: 3 mai. 2023.

IBGE. Censo agro 2017. 2017. Disponível em: https://censoagro2017.ibge.gov.br/. Acesso em: 11 set. 2023.

IBGE. Produção Agropecuária. 2022a. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/. Acesso em: 10 set. 2023.

IBGE. Cidades e Estados do Brasil. 2022b. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ba/conceicao-da-feira/panorama. Acesso em: 19 dez. 2023.

IBGE. Com alta nos Serviços e na Indústria, PIB varia 0,4% no terceiro trimestre. Agência IBGE notícias, [S. l.], 2022 c. Disponível em: https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/35651-com-alta-nos-servicos-e-na-industria-pib-varia-0-4-no-terceiro-trimestre. Acesso em: 10 set. 2023.

JUST M., Echaust K. Dynamic spillover transmission in agricultural commodity markets: What has changed after the COVID-19 threat? Economics Letters, [S. l.], v. 217, 2022. ISSN: 01651765. DOI: 10.1016/j.econlet.2022.110671.

LOURENÇO, Abílio Afonso; PAIVA, Maria Olímpia Almeida De. A motivação escolar e o processo de aprendizagem. Ciências & Cognição, [S. l.], v. 15, n. 2, 2010. ISSN: 1806-5821. Disponível em: http://www.cienciasecognicao.org/pdf/v15_2/12_132-141_m313.pdf. Acesso em: 11 set. 2023.

MAPBIOMAS. Plataforma MAPBIOMAS uso e cobertura. 2023. Disponível em: https://plataforma.brasil.mapbiomas.org. Acesso em: 3 mai. 2023.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. Fundamentos de metodologia científica. 6. ed., São Paulo: Atlas, 2009.

MATIAS, Rogério Gomes; SANTANA, Thiago Pires. Experiência de ensino em tempo de pandemia: desafios e potencialidades na aprendizagem dos fundamentos de matemática aplicada às ciências sociais. Extramuros, [S. l.], v. Suplementar, n. 1, p. 169–183, 2021. Disponível em: https://www.periodicos.univasf.edu.br/index.php/extramuros/article/view/1952/1187. Acesso em: 10 set. 2023.

MEDEIROS, João Bosco. Redação Científica: a prática de fichamentos, resumos, resenhas. 11. ed., São Paulo: Atlas, 2009. ISBN: 978-85-224-5339-9.

PESSOA, Ruben Vivaldi Silva; DE CARVALHO BARRETO, Ikaro Daniel; DA SILVA ARAÚJO, Lidiane; MOREIRA, Guilherme Rocha; STOSIC, Tatijana; STOSIC, Borko. Correlações em séries temporais de preços de frango, soja e milho. Research, Society and Development, [S. l.], v. 10, n. 4, p. e20610414019, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i4.14019.

SANTANA, Thiago Pires; HORTA, Nicole; CHAMBINO, Mariana; VASCONCELOS, Rodrigo; DIAS, Rui Manuel; ZEBENDE, Gilney. Interdependence and Contagion of Effect in the Agri-cultural Commodities Market: A Bibliometric Analy-sis. PrePrint, [S. l.], 2023 a. DOI: 10.20944/preprints202306.1078.v1. Disponível em: https://www.preprints.org/manuscript/202306.1078/v1. Acesso em: 10 set. 2023.

SANTANA, Thiago Pires; HORTA, Nicole; REVEZ, Catarina; DIAS, Rui Manuel Teixeira Santos; ZEBENDE, Gilney Figueira. Effects of Interdependence and Contagion on Crude Oil and Precious Metals According to ñDCCA: A COVID-19 Case Study. Sustainability, [S. l.], v. 15, n. 5, p. 3945, 2023 b. ISSN: 2071-1050. DOI: 10.3390/su15053945. Disponível em: https://www.mdpi.com/2071-1050/15/5/3945. Acesso em: 10 set. 2023.

SANTANA, Thiago Pires; MATIAS, Rogério Gomes; SANTANA, Paulo Henrique Gomes. Conceitos da Teoria dos Grafos no desenvolvimento do raciocínio lógico aplicados aos jogos com estudantes da EJA. Boletim Cearense de Educação e História da Matemática, [S. l.], v. 10, n. 29, p. 1–19, 2023. ISSN: 2447-8504. DOI: 10.30938/bocehm.v10i29.10347. Disponível em: https://revistas.uece.br/index.php/BOCEHM/article/view/10347. Acesso em: 10 set. 2023.

SILOCHI, Rose Mary Helena Quint; LIMA, Romilda De Souza; DE OLIVEIRA, Ivanira Correia. Agroindústria familiar: Experiência profissionalizante da Cooperativa da Agricultura Familiar Integrada (COOPAFI) em Francisco Beltrão – PR. Revista ELO – Diálogos em Extensão, [S. l.], v. 2, n. 1, 2015. ISSN: 2317-5451. DOI: 10.21284/elo.v2i1.7. Disponível em: https://periodicos.ufv.br/elo/article/view/986. Acesso em: 10 set. 2023.

UN. What is Sustainable Development? 2023. Disponível em: https://www.un.org/sustainabledevelopment/blog/2023/08/what-is-sustainable-development/. Acesso em: 18 dez. 2023.

WANG, Qiang; YANG, Xuan; LI, Rongrong. The impact of the COVID-19 pandemic on the energy market – A comparative relationship between oil and coal. Energy strategy reviews, [S. l.], v. 39, p. 100761, 2022. ISSN: 2211-467X. DOI: 10.1016/j.esr.2021.100761.

Submetido em: 05/10/2023 Aceito em: 28/05/2024.

RGSA – Revista de Gestão Social e Ambiental
**ISSN:** 1981-982X
**Submission date:** 05/03/2024
**Acceptance date:** 07/05/2024
**DOI:** https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n7-197
**Organization:** Interinstitutional Scientific Committee
**Chief Editor:** Éverton Hillig
**Assessment:** Double Blind Review pelo SEER/OJS

# DYNAMIC ANALYSIS OF VEHICLE ROBBERIES AND THEFTS: AN APPROACH WITH SLIDING WINDOWS

**Aloisio M. da Silva Filho** [1]
**Nilton Ribas Junior** [2]
**Gilney Zebende** [3]
**Elvira C. S. Ferreira** [4]
**Thiago P. Santana** [5]
**Rui Dias** [6]
**Everaldo F. Guedes** [7]
**Rosa Galvão** [8]
**Sidalina Gonçalves** [9]

**ABSTRACT**

**Objective:** This article aims to jointly analyse the time series of the rates of stolen vehicles and stolen vehicles daily in Salvador, Bahia, Brazil, using DFA and DCCA methods, both with the sliding windows approach.

**Theoretical Framework:** Salvador, the capital of the state of Bahia and the geographic space of the research, has the second largest fleet of motor vehicles in the northeast region of Brazil and the eighth when compared to other municipalities in Brazil.

**Method:** The DFA and ρDCCA with Sliding Windows were used. The DFA is a statistical method that estimates autocorrelation in non-stationary time series on different time scales.

**Results and Discussion:** Through exploratory data analysis, some properties were identified, such as positive asymmetry, stationarity, and nonstationarity depending on the year and crime assessed, as well as inverse fluctuation over the years between the average rates of stolen and stolen vehicles. The sliding windows approach identified greater relative variability around the average vehicle theft rate from 2004 to 2015 for w= 365 and from 2004 to 2016 for w = 1000 and a higher frequency of persistent autocorrelation (αDFA >0.50) (w=365 and w=1000). While the level of cross-correlation varied qualitatively between positive (ρDCCA (n) >0) and negative (ρDCCA (n) <0) depending on the year, time scale, window and crime assessed.

[1] Department of Exact Sciences, Universidade estadual de Feira de Santana, Bahia, Brazil.
E-mail: aloisioestatistico@uefs.br, Orcid: https://orcid.org/0000-0001-8250-1527
[2] Postgraduate program in Modeling in Earth and Environmental Sciences, Universidade estadual de Feira de Santana, Bahia, Brazil. E-mail: niltonribasjr@gmail.com Orcid: https://orcid.org/0000-0003-2170-136X
[3] Postgraduate program in Modeling in Earth and Environmental Sciences, Universidade estadual de Feira de Santana, Bahia, Brazil. E-mail: gfzebende@uefs.br Orcid: https://orcid.org/0000-0003-2420-9805
[4] Department of Exact Sciences, State University of Feira de Santana, Bahia, Brazil. Postgraduate program in Modeling in Earth and Environmental Sciences, Universidade estadual de de Santana, Bahia, Brazil.
E-mail: elviracatiana.osf@gmail.com
[5] Department of Exact Sciences, Universidade estadual de Feira de Santana, Bahia, Brazil. Postgraduate program in Modeling in Earth and Environmental Sciences, Universidade estadual de Feira de Santana, Bahia, Brazil.
E-mail: tpsantana@uefs.br Orcid: https://orcid.org/0000-0002-6353-1293
[6] Instituto Politécnico de Setúbal, Escola Superior de Ciências Empresariais, Setúbal, Portugal and ESCAD-Instituto Politécnico da Lusofonia, Lisboa, Portugal. E-mail: rui.dias@esce.ips.pt
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-6138-3098
[7] Climério de Oliveira Maternity Hospital, Brazil. E-mail: efgestatistico@gmail.com
[8] Instituto Politécnico de Setúbal, Escola Superior de Ciências Empresariais, Setúbal, Portugal.
E-mail: rosa.galvao@esce.ips.pt Orcid: https://orcid.org/0000-0001-8282-6604
[9] Instituto Politécnico de Setúbal, Escola Superior de Ciências Empresariais, Setúbal, Portugal.
E-mail: sidalina.goncalves@esce.ips.pt Orcid: https://orcid.org/0000-0002-4256-9479

**Conclusion:** Considering the complexity of the modelled series, the methodology used, and our findings, we hope to contribute to research related to the topic and initiatives to monitor, mitigate and plan to combat these crimes.

**Keywords:** Time Series, Robberies and Vehicle Thefts, DFA, ρDCCA Coefficient.

## ANÁLISE DINÂMICA DE ROUBOS E FURTOS DE VEÍCULOS: UMA ABORDAGEM COM JANELAS DESLIZANTES

### RESUMO

**Objetivo:** Este artigo tem como objetivo analisar conjuntamente as séries temporais das taxas de veículos roubados e de veículos roubados diariamente em Salvador, Bahia, Brasil, utilizando os métodos DFA e DCCA, ambos com a abordagem de janelas deslizantes.

**Referencial Teórico:** Salvador, capital do estado da Bahia e espaço geográfico da pesquisa, possui a segunda maior frota de veículos automotores da região nordeste do Brasil e a oitava quando comparada aos demais municípios do Brasil.

**Método:** Foram utilizados o DFA e o ρDCCA com Janelas Deslizantes. O DFA é um método estatístico que estima a autocorrelação em séries temporais não estacionárias em diferentes escalas temporais.

**Resultados e Discussão:** Através da análise exploratória dos dados, algumas propriedades foram identificadas, como assimetria positiva, estacionariedade e não-estacionariedade dependendo do ano e do crime avaliado, bem como flutuação inversa ao longo dos anos entre as taxas médias de veículos roubados e furtados. A abordagem de janelas deslizantes identificou maior variabilidade relativa em torno da taxa média de furto de veículos de 2004 a 2015 para w= 365 e de 2004 a 2016 para w = 1000 e uma maior frequência de autocorrelação persistente (αDFA >0,50) (w=365 e w=1000). Já o nível de correlação cruzada variou qualitativamente entre positivo (ρDCCA (n) >0) e negativo (ρDCCA (n) <0) dependendo do ano, escala temporal, janela e crime avaliado.

**Conclusão:** Considerando a complexidade da série modelada, a metodologia utilizada e nossos resultados, esperamos contribuir para pesquisas relacionadas ao tema e iniciativas de monitoramento, mitigação e planejamento de combate a esses crimes.

**Palavras-chave:** Séries Temporais, Roubos e Furtos De Veículos, DFA, coeficiente ρDCCA.

## ANÁLISIS DINÁMICO DE ROBOS Y HURTOS DE VEHÍCULOS: UN ENFOQUE CON VENTANAS DESLIZANTES

### RESUMEN

**Objetivo:** Este artículo tiene como objetivo analizar conjuntamente las series temporales de las tasas de vehículos robados y vehículos robados diariamente en Salvador, Bahía, Brasil, utilizando los métodos DFA y DCCA, ambos con el enfoque de ventanas deslizantes.

**Marco teórico:** Salvador, la capital del estado de Bahía y el espacio geográfico de la investigación, tiene la segunda mayor flota de vehículos de motor en la región noreste de Brasil y la octava en comparación con otros municipios de Brasil.

**Método:** Fueron utilizados el DFA y el ρDCCA con Ventanas Corredizas. El DFA es un método estadístico que estima la autocorrelación en series temporales no estacionarias en diferentes escalas temporales.

**Resultados y discusión:** A través del análisis exploratorio de datos se identificaron algunas propiedades, como asimetría positiva, estacionariedad y no estacionariedad en función del año y del delito evaluado, así como fluctuación inversa a lo largo de los años entre las tasas medias de vehículos robados y sustraídos. El enfoque de ventanas deslizantes identificó una mayor variabilidad relativa en torno a la tasa media de robo de vehículos de 2004 a 2015 para w= 365 y de 2004 a 2016 para w = 1000 y una mayor frecuencia de autocorrelación persistente (αDFA >0,50) (w=365 y w=1000). Mientras que el nivel de correlación cruzada varió cualitativamente entre

positivo (ρDCCA (n) >0) y negativo (ρDCCA (n) <0) en función del año, la escala temporal, la ventana y el delito evaluado.

**Conclusiones:** Teniendo en cuenta la complejidad de las series modeladas, la metodología utilizada y nuestros resultados, esperamos contribuir a la investigación relacionada con el tema y a las iniciativas para vigilar, mitigar y planificar la lucha contra estos delitos.

**Palabras clave:** Series temporales, robos y hurtos de vehículos, DFA, coeficiente ρDCCA.



## 1 INTRODUCTION

Crime is a socio-economic phenomenon that occurs in various locations around the world, in large urban centres (Grubesic & Mack, 2008; Saraiva et al., 2021; van Dijk et al., 2021) and is also considered one of the main contemporary problems (Santos & Kassouf, 2012). However, depending on the geographic space and/or period, its manifestation occurs with different magnitudes. For example, the recent study conducted by van Dijk et al. (2021) in 166 countries proved thatcrime is more prevalent in African and Latin American countries, followed by Asian countries. According to the same authors, European, North American, and Oceanic countries have a prevalence of crime at intermediate or low levels.

Due to the aforementioned reality, the importance of the topic and other factors, it is possible to find research in the literature that evaluated crime statistics considering different aspects, such as author characteristics (Costa et al., 2018), victim profile (Betânia et al., 2012), place of occurrence (Grubesic & Mack, 2008; Saraiva et al., 2021; Krimmel & Mele, 1998; Peixoto et al., 2004; Francisco Filho, 2004; dos Anjos Junior et al., 2020), time trend (van Dijk et al., 2021; Santos & Kassouf, 2012; LaFree et al., 2011; Alegre-Mondragón & Silva-Arias, 2022) and other properties (Mao et al., 2018; Tompson et al., 2022; Prieto Curiel, 2021). From this perspective, studies conducted by (Kahn, 2000; Kahn, 2005; Machado Filho et al., 2014) presented other relevant points that must be considered when statistically evaluating crime: seasonality, season and data source.

As a methodological option, this investigation will analyse crime statistics over time, specifically crimes against property and vehicle theft. According to Santos & Kassouf (2012) and Machado et al. (2017), vehicle theft and vehicle robbery crimes are generally used as an indicator of crime, mainly due to the economic value of the stolen property and low underreporting, since the victim needs to recover the vehicle and/or calling the insurance

company must generally register the crime with a police authority through a police report. According to Mao et al. (2018), crimes related to vehicle theft provide direct uninsured financial losses, the opportunity cost of the time needed to deal with the crime, the opportunity cost of the temporary unavailability of a vehicle and the costs psychological aspects of victimisation.

Vehicle subtraction (vehicle robbery and/or vehicle theft) has been evaluated by researchers, considering different methodologies in the statistical analysis. In this sense, it is possible to cite: The research by Cohen et al. (1985) that estimated the statistical difference between two procedures to calculate the rates of car thefts and robberies over 27 years in the United States; The study by Tseng et al. (2023) used a set of data mining techniques to predict vehicle thefts based onthe behavior of the perpetrators and other variables; The investigation by Sundt (2022) that analyzed an interrupted time series of robbery vehicles in Californiafrom 2011 to 2018 with the aim of replicating previous research that found a moderate to strong association between the time series of stolen automobiles and adoption of the law realignment of public security; The Brazilian Public Security yearbook as a descriptive analysis of robbery and thefts of vehicles by federation unit in the year 2022 (FBSP, 2023); The article by Mao et al. (2018) used a geographic information system, regression model and time series analysis inorder to identify spatial-temporal patterns in vehicle theft in a location in Shanghai, China, among others.

However, despite the importance of statistics on crimes related to vehicle subtraction, to date, no studies have been identified in the literature that have evaluated vehicle robbery and vehicle theft in conjunction with the sliding window procedure, which reveals the innovative nature of the present research.

Here the crimes of theft and vehicle robbery will be supported by an areaof knowledge called Time Series Analysis (an area of statistics that studies and models variables as a function of time) (Box & Jenkins, 1976; Morettin & Toloi, 2006; da Silva Filho, 2014). To characterise the fluctuations of time series with the sliding windows approach (dynamic analysis), descriptive analysis (mean and relative variation around the mean) will be used, the *Detrended Fluctuation Analysis*-DFA method, designed byPeng et al. (1994), which is capable of estimating autocorrelation on different $n$ time scalesof non-stationary series and the cross-correlation coefficient $\rho$DCCA implemented by Zebende (2011), which estimates the cross-correlation level of two-time series also in non-stationary regime.

The DFA method (Peng et al.,1994) and the $\rho$DCCA coefficient (Zebende, 2011) have been modelled jointly in areas of knowledge (Iqbal et al., 2020; Costa et al., 2019; Santos et al., 2019; Guedes, 2019; Filho et al., 2023) and specifically in the criminal area.

It is possible to cite the works (da Silva Filho et al., 2021; Machado Filho et al., 2014; Machado et al., 2017; da Silva Filho, 2014) that evaluated crime on differenttime scales in series with trend and seasonality characteristics.

To contribute to studies related to the analysis and modelling of criminal data, this article aims to jointly analyse the time series of thefts and robberies of vehicles (both crimes against property) daily in Salvador, Bahia, Brazil in the period of January 2004 to December 2022 with the sliding windows approach. In the next section, the methodology will be described (Section 2); in the subsequent section, the results and discussions will be displayed (Section 3); and, finally, the conclusions will be presented (Section 4).

## 2 METHODOLOGY

### 2.1 CHARACTERISTICS OF SALVADOR

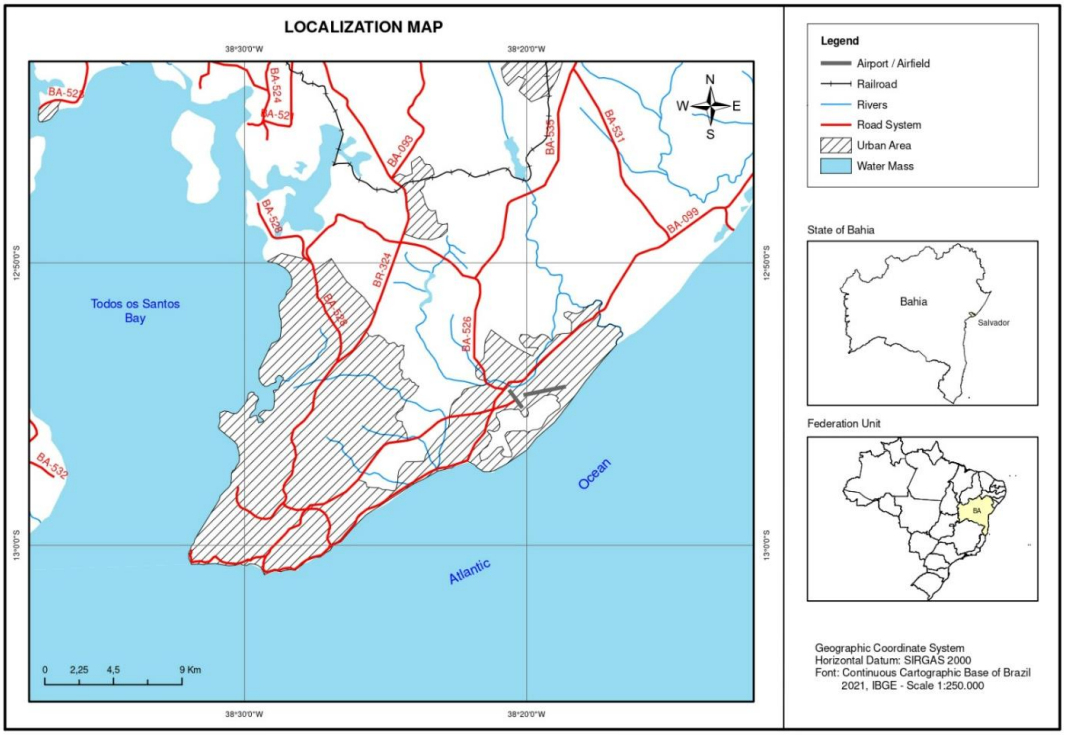
Salvador (Figure 1), the geographic area of the research, is the capital of the State of Bahia with 2,418,005 inhabitants; according to the 2020 demographic census, it is also the most populous municipality in the Northeast region and the fifth municipality most populous in the country with a demographic density of 3,486.96 inhabitants per $Km^2$ (IBGE, 2022). In terms of work and income, Salvador recorded a monthly salary of 3.2 minimum wages in 2021, among workers with a formal contract, leaving the municipality in fourth position in relation to the state of Bahia and ninety-sixth position in the national ranking.

Figure 1 displays Salvador's location map with relevant information: airport, railway section, drainage, road system, urban area, and bodyof water.

According to data from the Ministry of Transport (SENATRAN, 2022), Salvador in 2022 had a fleet of 1,006,292 registered vehicles (20.59% of Bahia's fleet), occupying the first position in the state of Bahia and eighth position in the ranking national (0.87% of Brazil's fleet). In relation to the municipalities that make up the northeast region of Brazil, the vehicle fleet in the capital of Bahia in the year 2022 occupied the second position (5.95% of the fleet in the northeast), second only to Fortaleza, the capital of Ceará. Salvador's vehicle fleet from 2004 to 2022 recorded an average growth rate of 4.46% (geometric mean).

**Figure 1**

*Location map of the municipality of Salvador, Bahia, Brazil.*




According to IBGE (2022), Salvador, in 2019, had an adequate sanitation rate of 92.8% (1st position in relation to the state) and approximately 39.5% of urban households on public roads with trees (358th position in relation to the state) and 35% of homes on public roads with adequate urbanization (29th position in relation to the state).

The information mentioned in this section reveals the importance of the capital of Bahia on the national scene, thus justifying its choice as the geographic space for the research.

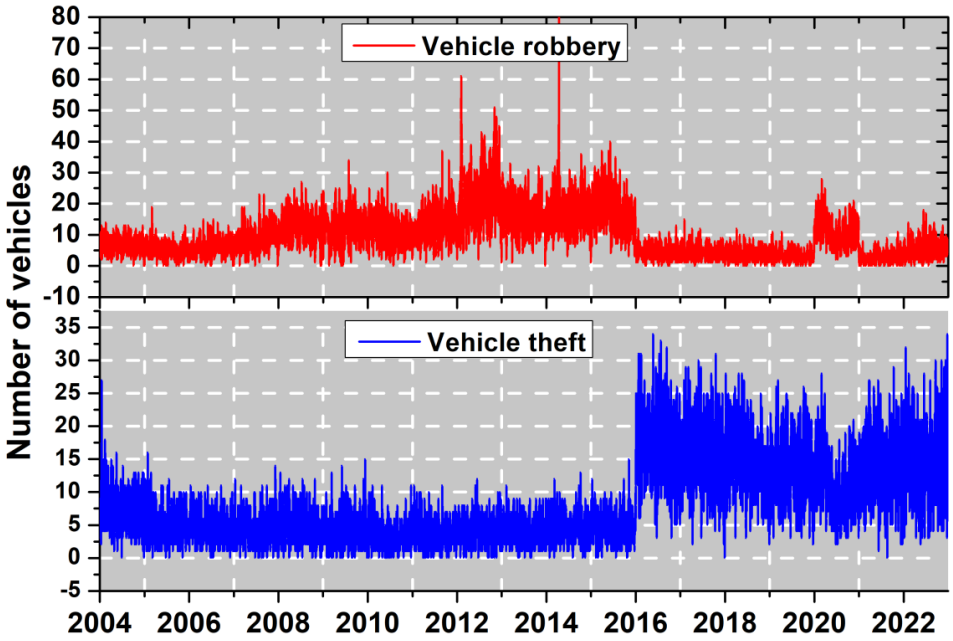
## 2.2 DATA

The historical series of robberies and vehicle thefts in Salvador from January 2004 to December 2022 was acquired from the Public Security Secretariat of the state of Bahia (SSP-BA, 2022). To conduct joint modelling between the theft and vehicle theft time series, the data were paired (series recorded onthe same date) (see Figure 2).

The vehicle theft indicator, in this research, is denoted as the sum of all theft occurrences (theft, for oneself or for others, of someone else's movable property) in which a land-based motor vehicle was taken: passenger car, taxi, pickup truck or unladen truck, public transport vehicle, motorcycle, scooter, etc. (Brazilian Penal Code, art. 155). Vehicle theft is the sum ofall incidents of robbery (robbery of another's movable property, for oneself or for another, through serious threat or violence against the person, or after having, by any means, reduced it to the impossibility of resistance) in from which the following were subtracted: land motor vehicle without transported cargo: passenger car, pickup truck, empty truck, public transport vehicle, motorcycle, scooter, etc. (Brazilian Penal Code, art. 157) (Machado et al., 2017).

**Figure 2**

*Original daily series of the variables studied, in the period between 2004 and 2022. Source: (SSP-BA, 2022).*



Data relating to the vehicle fleet in the capital of Bahia to obtain vehicle subtraction rates (robbed or stolen) were obtained from the Ministry of Transport (SENATRAN, 2022).

In the subsequent section, the properties of the DFA method, the ρDCCA coefficient, and aspects of the sliding windows procedure will be presented.

## 2.3 DFA AND ρDCCA – SLIDING WINDOWS

DFA is a statistical method capable of estimating autocorrelation in non-stationary time series on different time scales. The DFA method is based onthe fluctuation function, $F_{DFA}(n)$, and calculated by the following algorithm (Peng et al.,1994):

1 – Consider a time series, $\{u(i)\}$, where $i = 1, \dots, Nmax,$ and $Nmax$ is the length of the time series. We integrate $u(i)$ to obtain $y(k) = \sum_{i=1}^{k}[u(i) - < u >]$, so that $< u >$ is the average of $u$.

2 - The integrated series $y(k)$ is divided into boxes of equal length $n$ (time scale).

3 - For each box of size $n$, we adjust $y(k)$, using a polynomial function of order $l$, which represents the trend in the box. The $y$ coordinate of the fit line in each box is denoted by $y_n(k)$, as we use a polynomial fit of order $l$, we denote the algorithm by DFA- $l$.

4 - The integrated signal $y(k)$ is subtracted by the local trend $y_n(k)$ in each bin (of length $n$).

5 - For a given box of size $n$, the root mean square of the fluctuation, $F(n)$, for this integrated and detrended signal is given by

$$F(n) = \left[\frac{1}{Nmax}\sum_{k=1}^{Nmax}[y(k) - y_n(k)]^2\right]^{1/2} \qquad (1)$$

6 - This calculation is repeated for a wide range of scales (boxes of size $n$) toprovide a relationship between $F_{DFA}$ and the box size $n$. Here $n$ varied from $4 < n < \frac{Nmax}{4}$.

For the DFA method, if long-range autocorrelation appears, then $F_{DFA} \sim n^{\alpha}$. Thus, using the aforementioned steps, it is possible to estimate the autocorrelation exponent α of the DFA method with the following interpretations (da Silva Filho et al., 2021; Walleczek, 2000; Santos et al., 2022; Filho et al., 2023):

α > 0.5 long-range persistent behaviour;

α < 0.5 long-range anti-persistent behavior, anti-correlated signal;

α = 0.5 no autocorrelation (no memory);

α ≅ 1.0 denotes time series with pink noise;

α > 1.0 non-stationary series with random walks;

α ≅ 1.5 it is possible to characterize the time series as Brownian noise.

According to da Silva Filho et al. (2021), using the exponent of the DFA method it is possible to estimate the degree to which variations in the past series can influence variations in the future series. And, due to its application in different areas ofknowledge (da Silva Filho et al., 2021; Santos et al., 2022; Heneghan & McDarby, 2000; Mirzayof & Ashkenazy, 2010; Toledo et al., 2022), some authors have evaluated statistical propertiesof DFA in different aspects (Carbone et al., 2004; Kristoufek, 2010). For more details on the DFA algorithm and properties, see (da Silva Filho et al., 2021; Filho et al., 2023; Filho et al., 2023; Kristoufek, 2010).

If the researcher is interested in measuring cross-correlation of two time series $x$ and $y$ of the same size $Nmax$, in a non-stationary regime, a coefficient proposed by Zebende (2011) can be used which is based on DFA (Peng et al., 1994) and Detrended Cross-Correlation Analysis (DCCA) (Podobnik & Stanley, 2008). To apply the cross-correlation coefficient ρDCCA$(n)$, it is necessary to follow the following steps (Zebende, 2011; Filho et al., 2023; Toledo et al., 2022):

1 – Calculate the integrated signals, $R_k \equiv \sum_{i=1}^{k}[x_i - < x >]$ and $R'_k \equiv sum_{i=1}^{k}[y_i - < y >]$, with $k = 1, \dots, Nmax$. Here $< x >$ and $< y >$ denote respectively the means of the series $x$ e $y$;

2 - We then divide the entire time series into $(Nmax - n)$ ov*erlap* boxes, each containing $(\mathrm{n} + 1)$ values. For both time series, in each bin starting at i and ending at $(\mathrm{i} + \mathrm{n})$, we calculate the local trend, $\hat{\mathrm{R}}_{k,i}$ e $\hat{\mathrm{R}}'_{k,i}$, with $(\mathrm{i} \leq \mathrm{k} \leq \mathrm{i} + \mathrm{n})$, as the ordinate of a linear fit using the least squares method;

3 - The detrended signal is the difference between the integrated seriesand the local trend. Therefore, the covariance of the residuals in each box $f_{DCCA}^2(n,i) \equiv 1/(n+1)\sum_{k=1}^{i+n}(R_k - \hat{\mathrm{R}}_{k,i})(\hat{\mathrm{R}}'_k - \hat{\mathrm{R}}_{k,i})$is calculated;

4 - Finally, the detrended covariance function is calculated by summingall $(Nmax - n)$ overlapping boxes of size $n$:

$$F^2{}_{DCCA}(n) \equiv (Nmax - n)^{-1} \sum_{i=1}^{Nmax-n} f^2{}_{DCCA}(n, i) \qquad (2)$$

And to quantify the level of cross-correlation between two time series, ina non-stationary regime, with the coefficient ρDCCA$(n)$ it is necessary to use the following equation (Zebende, 2011; Filho et al., 2023; Toledo et al., 2022; Zebende & da Silva Filho, 2018; Zebende et al., 2020):

$$\rho_{DCCA}(n) \equiv \frac{F^2{}_{DCCA}(n)}{F_{DFAx}(n)\, F_{DFAy}(n)} \qquad (3)$$

In the equation 3 $F^2{}_{DCCA_{xy}}(n)$ denotes the detrended covariance function of the DCCA method (Podobnik & Stanley, 2008) between the time series $x(t)$ and $y(t)$ while $F_{DFAx}(n)$ represents the detrended autocorrelation function of the DFA methodof the $x$ series and $F_{DFAy}(n)$ of the $y$ series. Another relevant characteristic of the coefficient ρDCCA$(n)$ is the fact that it is possible to measure cross-correlation on different time scales of size $n$ (Zebende, 2011; Filho et al., 2023).

Like other cross-correlation coefficients (Pearson, 1896), the values of the coefficient ρDCCA$(n)$ have a range of variations between

$-1.0 \leq$ ρDCCA$(n) \leq 1.0$

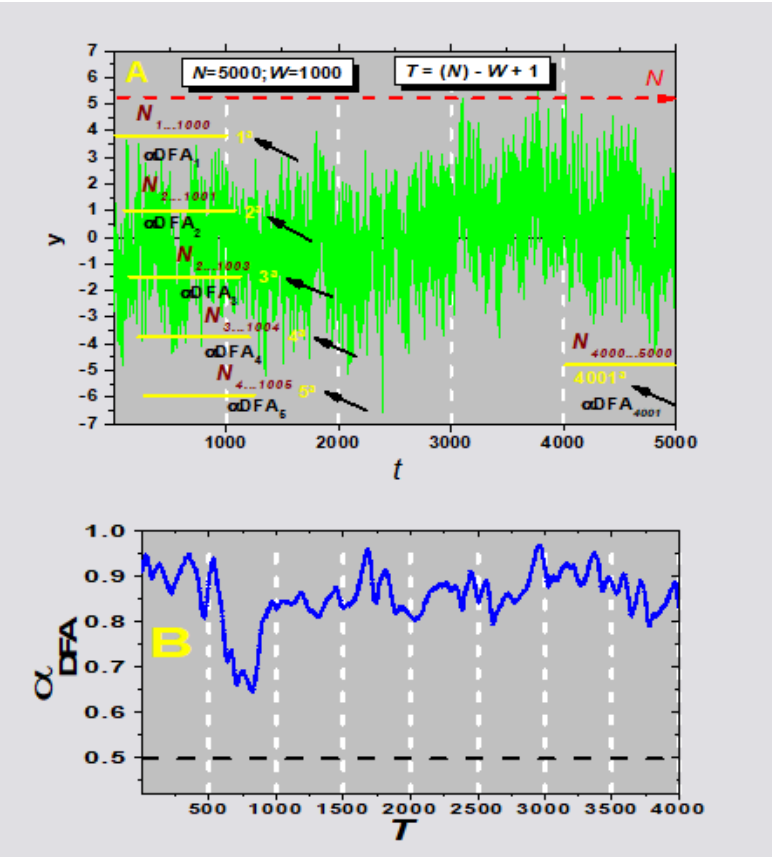
In this case, ρDCCA$(n) = 0$ means that there is no cross-correlation between the series $x$ and $y$, if ρDCCA$(n) \neq 0$ the correlation can be classified as positive or negative. And, unlike the Pearson correlation coefficient (Pearson, 1896), the ρDCCA(n) in its calculation considers the order of the pairs of the observations of the time series $x$ and $y$ (da Silva Filho, 2014). Furthermore, there is a generalisation of ρDCCA(n) idealised by Zebende & da Silva Filho (2018), which can be applied to more than two non- stationary time series, known in the literature as multiple cross-correlation coefficient $DMC_X^2$ (for more details see (Zebende & da Silva Filho, 2018; Brito et al., 2019; da Silva Filho et al., 2021; Guedes et al., 2021; Guedes et al., 2022).

Recently, researchers have modelled the DFA method (da Silva Filho et al., 2021; Santos et al., 2022; Anjos, 2013; dos Anjos et al., 2015) and the coefficient ρDCCA(n) (Guedes & Zebende, 2019; Guedes et al., 2021; Guedes, 2019) with the sliding windows procedure. Here, sliding windows consists of a statistical procedure that can be repeated systematically on one or more time series of size $N$. The objective of this methodology is to

have a dynamic view of a statistical measure (mean, standard deviation, asymmetry, kurtosis, autocorrelation, cross-correlation, coefficient of variation, among others) as a function of time ($t$) for a window of size ($w$) (Guedes & Zebende, 2019; da Silva Filho et al., 2021; Santos et al., 2022). For a better understanding of the sliding windows approach, consider figure 3, which illustrates this procedure for the exponentof the DFA method.

**Figure 3**

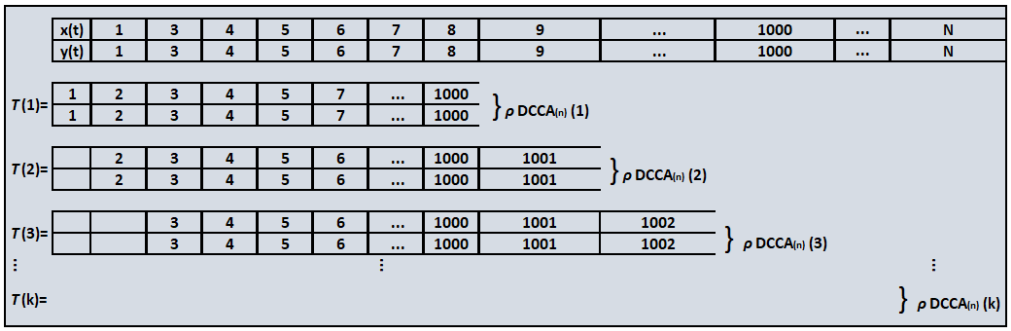
*Illustration of the DFA procedure with sliding windows. Graph "A" presents the original ARFIMA series (2,d,1) process with p(0.9;-0.5);d=0.49 and q=0.5 (see (Guedes et al., 2021)) and the graph "B" shows the time series of DFA exponents based on the sliding windowprocedure. Results generated with the R language with the package called SlidingWindow developed by (Guedes et al., 2021).*




Graph B in Figure 3 presents a time series of exponents of the DFA method for a window of size $w$=1000, in this way, it is possible to have a dynamic analysis of the autocorrelation of the series object of study (da Silva Filho et al., 2021; Santos et al., 2022; Guedes, 2019).

**Figure 4**

*Representation of the $\rho_{DCCA}$ procedure with sliding windows (w=1000).*




According to (Guedes & Zebende, 2019; Guedes et al., 2021; Tilfani et al., 2019), with two-time series ($x(t)$ and $y(t)$) of the same size $N$, it is possible to estimate the $\rho_{DCCA}(n)$ also with the sliding window procedure for a window of 1000 observations ($w$ = 1000), that is, the first coefficient $\rho_{DCCA}(n)_1$ to be calculated belongs the sample size $t$ =1, ..., $t$ = 1000 for both series simultaneously, for the next $\rho_{DCCA}(n)_2$ $t$ = 2, ..., $t$ = 1001 and so on (Figure 4).

The number of $T$ interactions of the sliding windows approach for a time series of size $N$ (see Figure 3 and Figure 4) is defined by the following expression (Guedes & Zebende, 2019):

$$T = N - w + 1; T = 1,2, \dots, k \qquad (4)$$

According to (Guedes & Zebende, 2019; Guedes et al., 2021), for example, for pairs of time series of the same size$N$ = 5000 and a window of $w$ = 1000 it is possible to obtain a time series from $\rho_{DCCA}(n)$ with 4001 points. Just like the works of (Guedes & Zebende, 2019; Guedes et al., 2021; Ferreira, 2021), in this research the time scale of size $n$ for $\rho_{DCCA}(n)$ varied from $4 < n < \frac{w}{4}$.

In the next section, the results and discussions will be presented so that itis possible to characterize the fluctuations in the time series of crimes evaluated by this research, considering properties related to variability, normality, trend, autocorrelation and cross-correlation.

## 3 RESULTS AND DISCUSSIONS

### 3.1 EXPLORATORY DATA ANALYSIS

To evaluate the fluctuations in robberies and vehicle thefts recorded daily by the Public Security Secretariat of Bahia (SSP-BA, 2022) in the municipality of Salvadorfrom January 2004 to December 2022, the daily crime rate was first calculated:

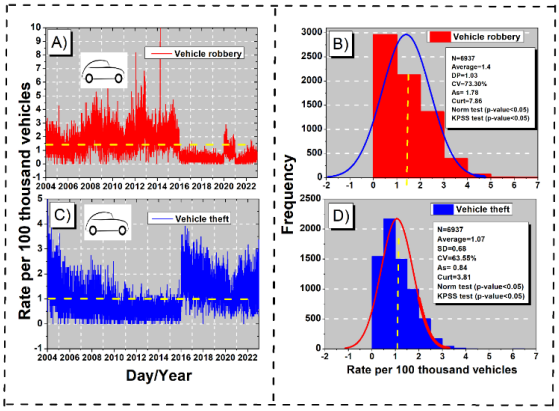
$$tx_v \equiv \frac{n_s}{fr_v} * 1000{,}000 \qquad (3)$$

In the equation 5 $n_s$ denotes the number of vehicles stolen or stolen in each period and $fr_v$ the vehicle fleet in Salvador for the year analyzed.

To meet the objective of this research, descriptive statistics were initially carried out on the series provided by the Public Security Secretariat of Bahia (SSP-BA, 2022), in order to measure crime fluctuations considering some descriptive measures (mean, standard deviation, asymmetry, kurtosis, coefficient of variation, data normality (Shapiro et al., 1968; Gavrilov & Pusev, 2014) and stationarity (Kwiatkowski et al., 1992; Trapletti & Hornik, 2019) throughout the period (see Figure 5).

**Figure 5**

*Descriptive statistics of the rates of stolen and stolen vehicles per 100 thousand vehicles in Salvador, Bahia, Brazil from January 2004 to December 2022. Source: (SSP-BA, 2022). Notes: The yellow dotted lines in graphs A, B, C and D denote the series averages in the period; Data processed by the authors.*



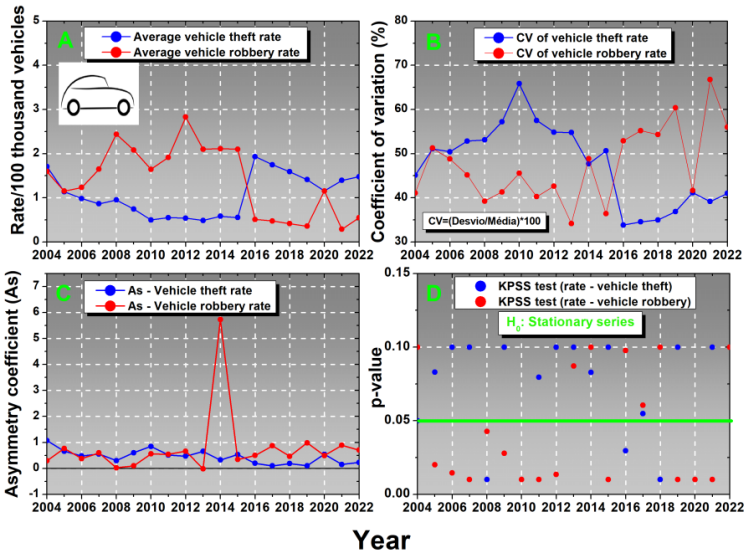
Analyzing Figure 5, it is possible to notice an inverse fluctuation between the rates of robberies and vehicle thefts in Salvador in certain periods. In other words, when there is an average increase in stolen vehicle rates (Figure 5-A), an average reduction in stolen vehicle rates is expected (Figure 5-C) and vice versa.

Considering the entire research period, Salvador recorded an average of 1.40 robberies vehicles daily for a group of 100 thousand vehicles (Figure 5 B)and an average rate of 1.07 thefts vehicles per 100 thousand vehicles (Figure 5 D). The crime rates evaluated showed positive asymmetric behaviour and relative variability greater than 50%, which denotes, respectively, a concentration of values below the average and high variability, typical behaviour ofnon-stationary time series. The crime rates studied presented kurtosis valuesgreater than 3 (K>3 leptokurtic curve). And, these results converged with the rejection of the null hypothesis of the KPSS stationarity test (p-value<0.05) and Shapiro and Wilk normality (p-value<0.05) (see Figures 5- B and 5-D).

As a complementary analysis, descriptive measures of the daily series of crimes from year to year were defined (mean, coefficient of variation, coefficient of asymmetry and KPSS stationarity test) (Figure 6). From 2006onwards, except for 2020, a clear inverse trend was identified in the fluctuations in the average rates of vehicle thefts and vehicle thefts recorded inSalvador (Figure 6-A). A similar result was also found in the time series ofcrime rate variation coefficients (Figure 6-B). In relation to the rate asymmetry coefficient, there was a predominance of positive asymmetry in thetime series of the present research (Figure 6-C). In the period from 2004 to2022, the crime rates in this research were characterized as stationary (p-value>0.05) and non-stationary (p-value<0.05), according to the KPSS test (Figure 6-D).

**Figure 6**

*Annual descriptive statistics of the rates of robbery and theft vehicles per 100 thousand vehicles in Salvador, Bahia, Brazil between 2004 and 2022. Source: (SSP-BA, 2022).*




As mentioned previously, the descriptive results reported in this section are typical of a time series of non-stationary behaviour and converged in these aspects in relation to research on crime (Machado Filho et al., 2014; Machado et al., 2017; da Silva Filho 201; Oliveira et al., 2020).

An increasing trend in vehicle robbery rates relative to the vehicle theftrate was observed in the period 2008 to 2016 (see Figure 5-A and Figure 5-C). According to Machado et al., (2017), this is worrying because vehicle theft is characterizedby a threat to the stolen vehicle's transporter and/or owner. From 2016 onwards, there was a reversal of this trend, when the theft rate showed an increasing trend and the robbery rate decreased. This reversal of the trend was due to criminals' greater dominance of technology.

## 3.2 DESCRIPTIVE STATISTICS – SLIDING WINDOWS

In order to dynamically analyse the historical series of the rates of robbery and theft vehicles in Salvador, sliding descriptive statistics were performed for a window of 365 days ($w$ =365) (1 year) and 1000 days ($w$=1000) as a function of the mean and the coefficient of

relative variation (Figure 7). The ($w$ =1000) window was used in this and subsequent sections with thepurpose of dynamically identifying the behaviour of fluctuations in the time series under study with a greater number of points.

**Figure 7**

*Average and coefficient of variation using the sliding windows approach (w =365 and w =1000) of the rates of theft vehicles and robbed vehicles per 100 thousand vehicles in Salvador, Bahia, Brazil between 2004 and 2022. Source: (SSP-BA, 2022).*

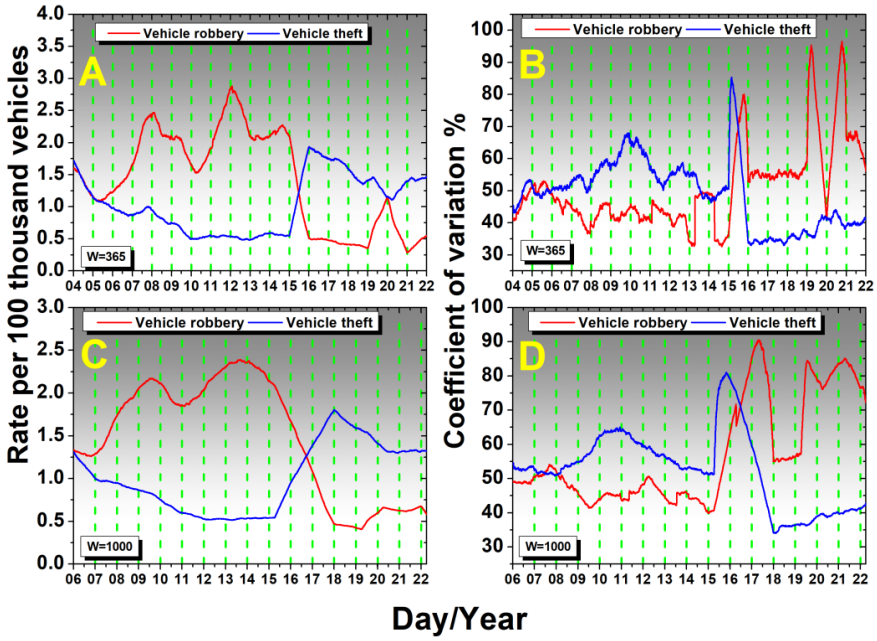



Figure 7 illustrates the behaviour of the mean and coefficient of relative variation of the crimes under study for a moving window of $w$=365 and $w$=1000 days. Using the sliding description for both windows, it was possible to observe convergent behaviour with that obtained in the exploratory analysis of annual data: An inversion in the average rate fluctuations (Figure 7-A and7-C ); Greater relative variability in vehicle theft rates until approximately the second half of 2016, and after this period greater relative variability in vehicle robbery rates (Figure 7-B and 7-D).

The qualitative analysis of the descriptive measures (mean and coefficientof relative variation) tended towards the same direction in both windows($w$ =365 and $w$ =1000),

however, with less variability in fluctuations for the approach with a larger window. And according to da Silva Filho et al., (2021) e Santos et al., (2022), when the window size ($w$) is increased, more successive subsamples are obtained from the series, enabling greater smoothness between the signals.

### 3.3 DFA – SLIDING WINDOWS

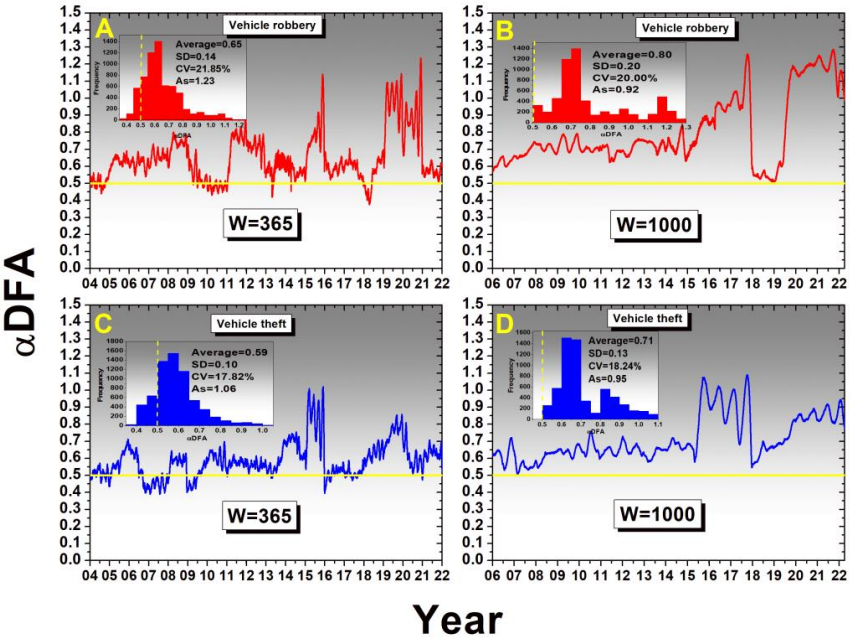
Figure 8 presents the results of the DFA with the sliding window procedure for the time series of the rates of robbery vehicles and stolen vehicles in the capital of Bahia during the study period for a window of $w$ =365 (Figure 8-A and Figure 8-C) and $w$ =1000 days (Figure 8-B andFigure 8-D). And, in addition, descriptive measures of the time series of the$\alpha$DFA exponents (Mean, standard deviation, relative variation coefficient and asymmetry coefficient) with their respective histograms.

Fluctuations in the exponents $\alpha$DFA of robbery and theft vehicle ratesfor a window of $w$ =365 days showed a higher frequency of persistent behaviour ($\alpha$DFA>0.50) (Figure 8-A and Figure 8-C). Using the histograms of figures8-A and 8-C for $w$ =365, a higher mean ($\alpha$DFA=0.65), asymmetry (1.23) and coefficient of variation (21.85%) in vehicle robbery. These results denotegreater stability in the time series of the exponents $\alpha$DFA of vehicle theft ($CV$ =17.82% and $As$=1.06).

For a window of $w$ =1000 days, the time series of the $\alpha$DFA exponents of crime rates were persistent (100%) for the entire period with the highestaverage for vehicle theft (0.80) (Figure 8-B), lower asymmetry (As=0.92)and lower relative variability (CV=20%) in vehicle robbery (Figure 8-D). With these findings, it is possible to state that the fluctuations of the $\alpha$DFA exponent for $w$ =1000 were more stable when compared to $w$ =365 days of the vehicle robbery variable.

**Figure 8**

*The behaviour of the exponent αDFA with the sliding window approach in the time series of the rates of robbery and theft vehicles in Salvador-BA, in the period between the years 2004 and 2022 for a window of size w =365 and w =1000 days. Source: (SSP-BA, 2022). Notes: Here SD=standard deviation, CV=coefficient of variation and As=coefficient of asymmetry; The vertical and horizontal lines in yellow denote the exponent αDFA=0.50.*




With the results presented in Figure 8, we can state that, on average, if there is a tendency for growth or decrease in the fluctuations in the rates of robbery and theft of vehicles, this behaviour tends to occur, in the long term, with greater intensity in the vehicle robbery time series.

Using the sliding windows methodology ($w$ =365 and $w$ =1000), in the time series of robbery and theft vehicle rates, it was also possible to verify $\alpha$DFA close to 1 (pink noise), which denotes a transition between stationaryand non-stationary behaviour (Figures 8 - A, B, C and D). Also $\alpha$DFA exponents greater than 1, mainly for $w$ =1000 from the year 2019 onwards (which means non-stationary persistent behaviour, with random paths) (see (Santos et al., 202; Filho et al., 2023; Ferreira, 2021; Walleczek, 2000)).

As mentioned previously, the fluctuations of the αDFA exponent, in general, showed smaller relative variations around the average exponent for a window of $w$ =1000 (Figure 8-B and Figure 8-D) than for a window of $w$ =365 (Figure 8-A and Figure 8-C). According to (Ferreira, 2021), this result may be related to the fact that DFA is more appropriate for time series with a size greater than or equal to 1000 ($N$ 1000). And this statistical property of DFA was proven in the research of (Kristoufek, 2010).

The results found here are in accordance with the characteristics of time series relating to crime: predominance of persistent behaviour and non-stationarity. And such results converged with the research of (da Silva Filho et al., 2021; Machado Filho et al., 2014; Machado et al., 2017; da Silva Filho, 2014; Filho, 2009).

3.4 ρDCCA(n) – SLIDING WINDOWS

In this section, the series of vehicle robbery and vehicle theft crime rateswill be jointly analyzed using the coefficient $\rho_{DCCA}(n)$, with the aim of quantifying the levels of cross-correlations between the two historical series, withan approach of sliding windows, through heat graphs.

To analyze Figures 9, 10, and 11, consider the classification presented in Table 1 (Ferreira, 2021).

**Table 1**

*Interpretation of the coefficient $\rho_{DCCA}(n)$ according to the levels of cross-correlations.*

| Variation | Classification |
|---|---|
| $0<\rho_{DCCA}(n)<0.20$ | Very weak |
| $0.20\leq\rho_{DCCA}(n)<0.40$ | Weak |
| $0.40\leq\rho_{DCCA}(n)<0.60$ | Moderate |
| $0.60\leq\rho_{DCCA}(n)<0.80$ | Strong |
| $0.80\leq\rho_{DCCA}(n)<1$ | Very strong |

Using Figure 9, it is possible to characterise the cross-correlation according to the coefficient $\rho$DCCA for a window of $w$ =365 (Figure 9-A) and for $w$ =1000 days (Figure 9-B) between the rates of robbed and stolen vehiclesdaily in Salvador-BA, from 2004 to 2022, for different time scales ($n$).

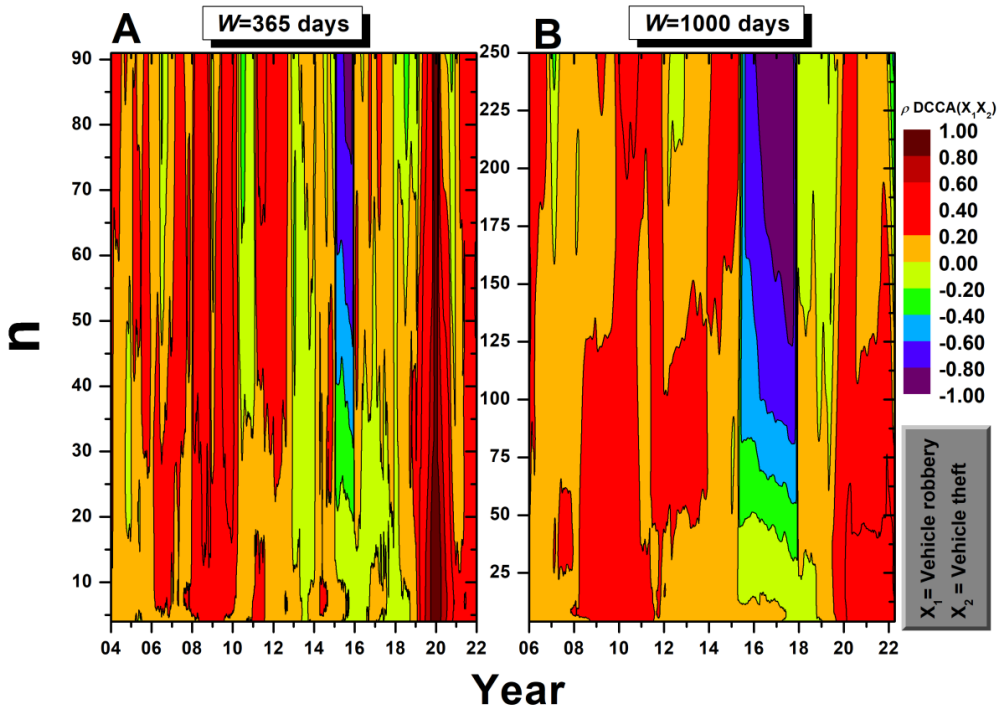
In general, the analysis of Figure 9 allows us to verify greater variability inthe fluctuations of $\rho$DCCA in the window of $w$ =365 (Figure 9-A) in relation to the window of size $w$ =1000 (Figure 9-B). In this aspect, the findings presented in Figure 9-A and Figure 9-B reveal the complexity of the behaviourof fluctuations in the series covered by this research.

Specifically for $w$ =365 days (Figure 9-A) from 2004 to 2010 there was a predominance of positive cross-correlation ($\rho$DCCA>0) varying qualitatively from very weak to moderate, and from 2010 to 2019, it varied - 0.80<$\rho$DCCA<1 (very weak to very strong) and from 2019 onwards a greateroccurrence of positive correlation ($\rho$DCCA>0) varying -0.20<$\rho$DCCA<0.80(weak, moderate and strong).

The cross-correlation for $w$ =1000 (Figure 9-B) between the time seriesof crimes that are the subject of this research was characterized, more frequently from 2006 to 2015, as a positive correlation ($\rho$ DCCA>0) with variation field 0<$\rho$DCCA<0.60, with some islands denoted as negative correlation($\rho$DCCA<0). Still, in relation to Figure 9-B, it was also possible to identify a clear presence of a negative correlation between the years 2015 and 2018 for all scales evaluated (4 <$n$ < 250) and from the period 2019 to the end of the series $\rho$DCCA varying -0.20<$\rho$DCCA<0.60 (weak, moderate and strong).

**Figure 9**

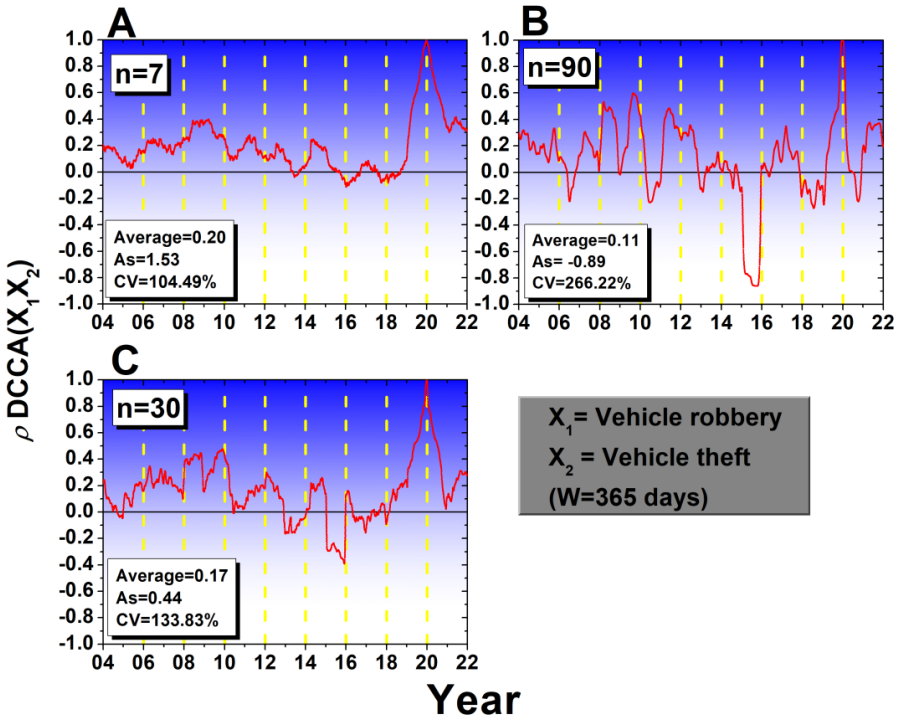
*Behavior of the ρDCCA coefficient with the sliding windows approach (w =365- graphic A and w =1000-graphic B) of the rates of daily robbery and theft vehicles inSalvador-BA, 2004 to 2022 Source: (SSP-BA, 2022). Data processed by the authors.*




As in the research by (Guedes et al., 2021; Ferreira, 2021), by methodological choice, the results of the cross-correlation coefficient $\rho$DCCA(n) were presented with the sliding windows approach ($w$ =365 and $w$ =1000) for specific size scales ($n$), asa complementary analysis (see Figure 10 and Figure 11).

**Figure 10**

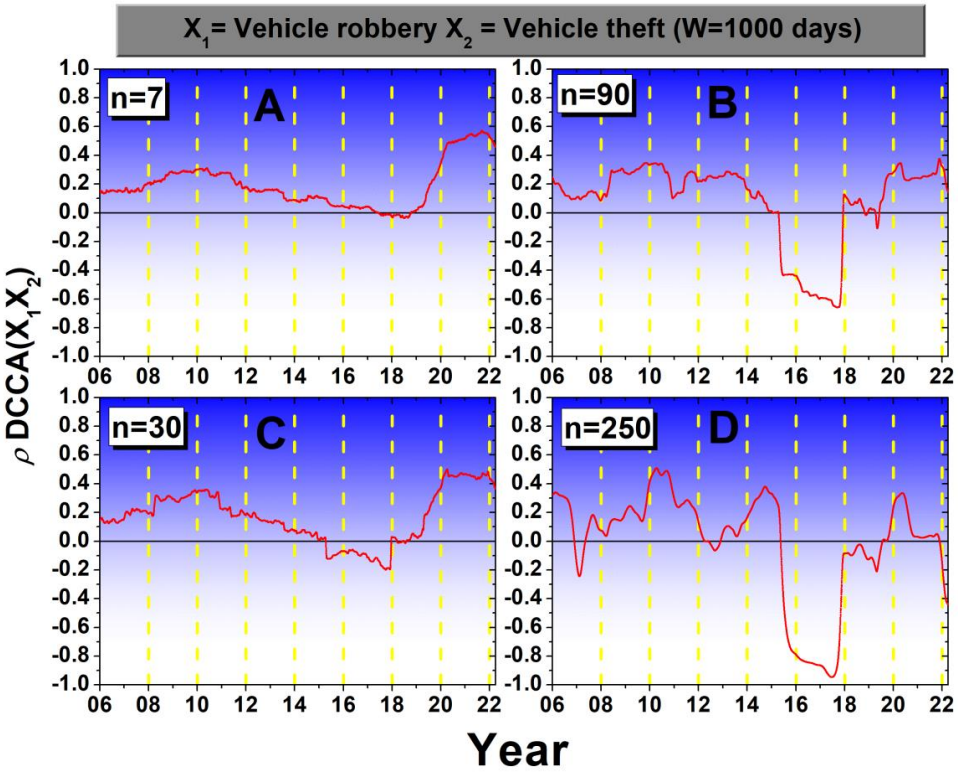
*The behaviour of the ρDCCA coefficient with the sliding windows approach (w =365), with specific time scales (n) of the time series of the rates of robbery and theft vehicles in Salvador-BA, 2004 to 2022 (n=7-graph A, n=90-graph B and n=30-graph C). Here As=Asymmetry, CV=(Standard deviation/mean )x100. Source: (SSP-BA, 2022).*




In Figure 10 it can be seen that the smallest variabilities are present on the smaller scales ($n$ =7 (Figure 10-A) and $n$ =30 (Figure 10- C)) and thegreatest variability on the scale corresponding to ninety days (Figure 10- B))(CV=266.22%), being also the only one that obtained negative asymmetry (concentration of *ρvalues* DCCA above average). Highlight for the year 2020 with ρDCCA=1 for all scales evaluated (Figure 10) and in the periods between the years 2015 and 2016 higher negative correlations for $n$ = 90 (Figure 9 -B).

**Figure 11**

*Behaviour of the ρDCCA coefficient with the sliding windows approach (w =1000) with specific time scales (n) of the time series of the rates of robbery and theft vehicles in Salvador-BA-2004 to 2022 (n=7-graphic A, n=90-graphic B, n=30-graphic C and n=250- graphic D).Source: (SSP-BA, 2022).*




In figure 11 there was a similar result to that found in figure 10, thatis, greater variability in the fluctuations of $\rho$DCCA on the largest scales($n > 30$) and between the years 2015 and 2018 occurrence of higher negative correlation values for these scales (Figure 11-B and Figure 11-D). The resultsillustrated in Figures 10 and 11 for specific scales converge in relation to theresearch by (Guedes et al., 2021; Ferreira, 2021), which found greater variations, as a function of time, inthe $\rho$DCCA coefficient also on the largest time scales.

Regarding $\rho$DCCA in the time series of theft and vehicle theft, our results converge with the research by (Machado et al., 2017), who also evaluated vehicle theft and vehicle robbery, in the following aspects: quantitative and qualitative variability in the cross-correlation values; inversion of correlation values insome evaluated periods.

It is important to highlight that, to date, the use of the sliding windows approach with ρDCCA, specifically with criminal data, has not been found in the literature, which reveals the innovative nature of the present research.

## 4 CONCLUSION

In this research, we investigated the properties of fluctuations in the dailyrates of robbed and theft vehicles in Salvador-BA from January 2004 to December 2022 using the sliding windows approach ($w$=365 and $w$=1000). The approach was conducted with descriptive statistics, DFA and $\rho_{DCCA}$.

The descriptive and exploratory analysis of the data identified an inversefluctuation between the rates of robbed and stolen vehicles in certain periods. And in addition, typical behaviour of non-stationary time series. The results of the sliding descriptive statistics were convergent to those obtained in theexploratory analysis of annual data and qualitatively the descriptive measures (mean and coefficient of variation) tended in the same direction, but with less variability in the window size $w$=1000.

The DFA with sliding windows ($w$=365 and $w$=1000) found a predominance of persistent behaviour ($\alpha$DFA>0.50) in the time series rates of robbedand stolen vehicles with lower variability in the $w$=1000 window, corroborating some studies that used DFA to measure autocorrelation for the same window sizes (see (da Silva Filho et al., 2021; Ferreira, 2021).

The cross-correlation with the sliding windows approach, between the series object of this research, showed quantitative and qualitative variabilitydepending on the temporal scale ($n$), window size ($w$=365 and $w$ =1000) and year assessed. Highlighting the window of size $w$ =1000 which presented, in general, less variation in the fluctuations of the $\rho_{DCCA}$ time series.

The findings presented here converged with the research on crime by (da Silva Filho et al., 2021; Machado Filho et al., 2014; Machado et al., 2017; da Silva Filho, 2014; Filho, 2009) in some aspects, mainly related to autocorrelation andcross-correlation.

The main limitation of this research is related to the use of administrative records relating to the crime (occurrence report). And according to (Kahn, 2000), notall crimes that occur in society are recorded. However, the crimes studiedin this research are those with one of the lowest underreporting statistics,due to the need to register the vehicle theft

with a police authority to enable, for example, claims with the insurance company. Therefore, the results presented in this research are as close to reality as possible.

Finally, given what was presented in this research, we are offering those interested in the topic another way to analyze data related to crime, specifically the indicators of robbed and stolen vehicles. In this way, providing information that can guide the development of public policies and more effective strategies to combat and reduce crimes studied by public and private agents.

## REFERENCES

Alegre-Mondragón, A. J., & Silva-Arias, C. (2022). Effects of COVID-19 in Mexico city: Street robbery and vehicle theft spatio-temporal patterns. Em Lecture Notes in Geoinformation and Cartography (pp. 195–205). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-98096-2_14

Anjos, d. P. S. (2013). Correlações de longo alcance em séries temporais da velocidade do vento e radiação solar em Fernando de Noronha, Brasil., Dissertação (mestrado)- programa de pós-graduação em biometria e estatística aplicada, Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRP), Pernambuco.

Betânia, P., Letícia, G., & Lima, R. S. (2012). Uma análise sistêmica: vitimização e políticas de segurança em São Paulo. Revista do Serviço Público, 63, 217–236. URL http://bibliotecadigital.economia.gov.br/handle/123456789/525067

Box, G. E. P., Jenkins, G. M. (1976). Time Series Analysis: Forecasting and control, Holden-Day, São Francisco.

Brito, A. de A., Araújo, H. A. de, & Zebende, G. F. (2019). Detrended Multiple Cross-Correlation Coefficient applied to solar radiation, air temperature and relative humidity. Scientific Reports, 9(1). https://doi.org/10.1038/s41598-019-56114-6

Carbone, A., Castelli, G., & Stanley, H. E. (2004). Time-dependent Hurst exponent in financial time series. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 344(1-2), 267–271. https://doi.org/10.1016/j.physa.2004.06.130

Cohen, L. E., Kaufman, R. L., & Gottfredson, M. R. (1985). Risk-based crime statistics: A forecasting comparison for burglary and auto theft. Journal of Criminal Justice, 13(5), 445–457. https://doi.org/10.1016/0047-2352(85)90044-3

Costa, L. P., Rocha, C. J. B., & Cavalcante, L. I. C. (2018). Características biopsicossociais entre acusados de agressão sexual contra crianças/adolescentes em contextos intra e extrafamiliar. Temas Em Psicologia, 26(1), 283–295. https://doi.org/10.9788/tp2018.1-11pt

Costa, N., Silva, C., & Ferreira, P. (2019). Long-range behaviour and correlation in DFA and DCCA analysis of cryptocurrencies. International Journal of Financial Studies, 7(3), 51. https://doi.org/10.3390/ijfs7030051

da Silva Filho, A. M., Zebende, G. F., & Guedes, E. F. (2021). Analysis of intentional lethal violent crimes: A sliding windows approach. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 567, 125653. https://doi.org/10.1016/j.physa.2020.125653

da Silva Filho, A. M. (2014). Autocorrelação e correlação cruzada: Teorias e aplicações, Ph.D. thesis, Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial. Faculdade Senai Cimatec.

Dos Anjos Junior, O. R., Lima, R. O., Coêlho Lombardi Filho, S., Aléssio Tony Cavalcanti de Almeida, & Hilton Martins de Brito Ramalho. (2020). Padrões de Concentração Espacial de Roubos de Automóveis em Municípios da Grande João Pessoa a Partir de Técnicas de Aprendizado de Máquinas. Teoria e Prática em Administração, 11(2), 28–45. https://doi.org/10.22478/ufpb.2238-104x.2021v11n2.50891

dos Anjos, P. S., da Silva, A. S. A., Stošić, B., & Stošić, T. (2015). Long-term correlations and cross-correlations in wind speed and solar radiation temporal series from Fernando de Noronha Island, Brazil. Physica A, 424, 90–96. https://doi.org/10.1016/j.physa.2015.01.003

FBSP, F. B. de Segurança Pública, (2023). Anuário Brasileiro de Segurança Pública, São Paulo, ano 17. ISSN 1983-7364. URL https://publicacoes.forumseguranca.org.br/handle/fbsp/57

Ferreira, E. C. d. O. S. (2021). Modelagem espaço-temporal de variáveis climatológicas no estado da Bahia: uma abordagem com janelas deslizantes, Master's thesis, Universidade Estadual de Feira de Santana. URL http://tede2.uefs.br:8080/handle/tede/1444

Filho, F. M. O., Ribeiro, F. F., Cruz, J. A. L., de Castro, A. P. N., & Zebende, G. F. (2023). Statistical study of the EEG in motor tasks (real and imaginary). Physica A, 622(128802), 128802. https://doi.org/10.1016/j.physa.2023.128802

Filho, S., Gilney Figueira Zebende, Pereira, A., & Everaldo Freitas Guedes. (2021). Statistical test for Multiple Detrended Cross-Correlation Coefficient. Physica D: Nonlinear Phenomena, 562, 125285–125285. https://doi.org/10.1016/j.physa.2020.125285

Filho, A. M. d. S. (2009). Correlação de longo alcance em indicadores de criminalidade de Salvador/BA: Dfa e dcca., Dissertação (mestrado)- programa de pós- graduação em modelagem computacional e tecnologia industrial, Faculdade SENAI CIMATEC, Salvador.

Francisco Filho, L. L. (2004). Distribuição espacial da violência em Campinas: uma análise por geoprocessamento, Ph.D. thesis, UFRJ.

Gavrilov, I., Pusev, R. (2014). normtest: Tests for Normality, r package version 1.1. URL https://CRAN.R-project.org/package=normtest

Grubesic, T. H., & Mack, E. A. (2008). Spatio-Temporal Interaction of Urban Crime. Journal of Quantitative Criminology, 24(3), 285–306. https://doi.org/10.1007/s10940-008-9047-5

Guedes, E. F, A. P. N. de Castro, Filho, S., & G. F. Zebende. (2022). ΔDMCx2: A New Approach to Measure Contagion Effect on Financial Crisis. Fluctuation and Noise Letters, 21(04). https://doi.org/10.1142/s0219477522500262

Guedes, E. F., da Silva Filho, A. M., & Zebende, G. F. (2021). Detrended multiple cross-correlation coefficient with sliding windows approach. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 574, 125990. https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.125990

Guedes, E.F., Lima, I.C., Zebende, G.F., & Silva-Filho, A.M. (2020). Methods for Time Series Analysis [R package SlidingWindows version 0.1.7]. URL https://api.semanticscholar.org/CorpusID:228973742

Guedes, E. F., & Zebende, G. F. (2019). DCCA cross-correlation coefficient with sliding windows approach. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 527, 121286. https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.121286

Guedes, E. F. (2019). Modelo computacional para análise de movimentos e comovimentos de mercados financeiros., Ph.D. thesis, Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial. Faculdade Senai Cimatec.

Heneghan, C., & McDarby, G. (2000). Establishing the relation between detrended fluctuation analysis and power spectral density analysis for stochastic processes. Physical Review. E, Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics, 62(5), 6103–6110. https://doi.org/10.1103/physreve.62.6103

IBGE, Ibge cidades, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2022). URL https://cidades.ibge.gov.br/

Iqbal, J., Lone, K. J., Hussain, L., & Rafique, M. (2020). Detrended cross correlation analysis (DCCA) of radon, thoron, temperature and pressure time series data. Physica Scripta, 95(8), 085213. https://doi.org/10.1088/1402-4896/ab9fb1

Kahn, T. (2005). Estatística de criminalidade: Manual de interpreta¸c˜ao, Coordenadoria de An´alise e Planejamento - CAP, Secretaria de Seguran¸ca Pu´blica de S˜ao Paulo.

Kahn, T. (2000). Medindo a criminalidade: um panorama dos principais métodos e projetos existentes. Semin´ario Rio de Janeiro: IPEA/CeSEC-UCAM.

Krimmel, J. T., & Mele, M. (1998). Investigating stolen vehicle dump sites. Policing: An International Journal of Police Strategies & Management, 21(3), 479–489. https://doi.org/10.1108/13639519810228787

Krištoufek, L. (2010). Rescaled range analysis and detrended fluctuation analysis: Finite sample properties and confidence intervals. Czech Economic Review, 4(3), 315–329. http://ideas.repec.org/a/fau/aucocz/au2010_315.html

Kwiatkowski, D., Phillips, P. C. B., Schmidt, P., & Shin, Y. (1992). Testing the null hypothesis of stationarity against the alternative of a unit root. Journal of Econometrics, 54(1-3), 159–178. https://doi.org/10.1016/0304-4076(92)90104-y

LaFree, G., Dugan, L., Xie, M., & Singh, P. (2011). Spatial and Temporal Patterns of Terrorist Attacks by ETA 1970 to 2007. Journal of Quantitative Criminology, 28(1), 7–29. https://doi.org/10.1007/s10940-011-9133-y

Machado, A., G. Zebende, E. Guesdes, (2017). An´alise temporal das subtra¸c˜oes de veículos em Salvador-BA, Conjuntura & Planejamento 193 47–61.

Machado Filho, A., da Silva, M. F., & Zebende, G. F. (2014). Autocorrelation and cross-correlation in time series of homicide and attempted homicide. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 400, 12–19. https://doi.org/10.1016/j.physa.2014.01.015

Mao, Y., Dai, S., Ding, J., Zhu, W., Wang, C., & Ye, X. (2018). Space–Time Analysis of Vehicle Theft Patterns in Shanghai, China. ISPRS International Journal of Geo-Information, 7(9), 357. https://doi.org/10.3390/ijgi7090357

Mirzayof, D., & Ashkenazy, Y. (2010). Preservation of long range temporal correlations under extreme random dilution. Physica A, 389(24), 5573–5580. https://doi.org/10.1016/j.physa.2010.08.035

Morettin, P. A., & Clélia M. C. Toloi. (2006). Análise de Séries Temporais – Volume 2. Editora Blucher. /ABE-Projeto Fisher, São Paulo.

Oliveira Filho, F. M., Guedes, E. F., & Rodrigues, P. C. (2023). Networks analysis of Brazilian climate data based on the DCCA cross-correlation coefficient. PLOS ONE, 18(9), e0290838. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0290838

Oliveira, S.D., Guedes, E.F., & Zebende, G.F. (2020). Vulnerabilidade Social e Criminalidade na Região Metropolitana de Salvador: Uma abordagem com métodos quantitativos.

Pearson, K. (1896). VII. Mathematical contributions to the theory of evolution.—III. Regression, heredity, and panmixia. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character, 187, 253–318. https://doi.org/10.1098/rsta.1896.0007

Peixoto, B. T., Lima, R. S. de, & Durante, M. O. (2004). Metodologias e criminalidade violenta no Brasil. São Paulo Em Perspectiva, 18(1), 13–21. https://doi.org/10.1590/s0102-88392004000100003

Peng, C.-K. ., Buldyrev, SV, Havlin, S., Simons, M., Stanley, HE, & Goldberger, AL (1994). Organização em mosaico de nucleotídeos de DNA. Physical Review E , 49 (2), 1685–1689. https://doi.org/10.1103/physreve.49.1685

Podobnik, B., & Stanley, H. E. (2008). Detrended cross-correlation analysis: A new method for analyzing two nonstationary time series. Physical Review Letters, 100(8). https://doi.org/10.1103/physrevlett.100.084102

Prieto Curiel, R. (2023). Weekly crime concentration. Journal of Quantitative Criminology, 39(1), 97–124. https://doi.org/10.1007/s10940-021-09533-6

Santos, E. C. O., Guedes, E. F., Zebende, G. F., & da Silva Filho, A. M. (2022). Autocorrelation of wind speed: A sliding window approach. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 607, 128213. https://doi.org/10.1016/j.physa.2022.128213

Santos, J. V. C., Moreira, D. M., Moret, M. A., & Nascimento, E. G. S. (2019). Analysis of long-range correlations of wind speed in different regions of Bahia and the Abrolhos Archipelago, Brazil. Energy, 167, 680–687. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.015

Santos, M. J., & Kassouf, A. L. (2012). Avaliação de Impacto do Estatuto do Desarmamento na Criminalidade: Uma Abordagem de Séries Temporais Aplicada à Cidade de São

Paulo. Economic Analysis of Law Review, 3(2), 307–322. https://doi.org/10.18836/2178-0587/ealr.v3n2p307-322

Saraiva, M., Amante, A., Marques, T. S., Ferreira, M., & Maia, C. (2021). Perfis territoriais de criminalidade em Portugal (2009-2019). Finisterra, 56(116), 49–73. https://doi.org/10.18055/Finis20682

SENATRAN. (2022). Estatísticas - frota de veículos, Ministério dos Transporte. URL https://www.gov.br/transportes/pt-br

Shapiro, S. S., Wilk, M. B., & Chen, H. J. (1968). A comparative study of various tests for normality. Journal of the American Statistical Association, 63(324), 1343–1372. https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480932

SSP-BA, Dados relativos a crimes contra o patrimônio, Secretaria de Segurança Pública da Bahia (2022). URL https://ssp.ba.gov.br/informacoes-criminais/estatistica/?ano=2022

Sundt, J. (2022). Clarifying the effect of California Realignment on motor vehicle theft: results of an interrupted time series. Journal of Experimental Criminology. https://doi.org/10.1007/s11292-022-09545-7

Tilfani, O., Ferreira, P., & El Boukfaoui, M. Y. (2019). Dynamic cross-correlation and dynamic contagion of stock markets: a sliding windows approach with the DCCA correlation coefficient. Empirical Economics, 60(3), 1127–1156. https://doi.org/10.1007/s00181-019-01806-1

Toledo, O. C., Filho, S., Silva, A. B., & Zebende, G. F. (2022). Temporal Analysis of the Flows of the Rivers that form the Hydrographic Basin of Moquegua (Peru). Fluctuation and Noise Letters, 21(06). https://doi.org/10.1142/s0219477522500596

Tompson, L., Steinbach, R., Johnson, S. D., Teh, C. S., Perkins, C., Edwards, P., & Armstrong, B. (2022). Absence of street lighting may prevent vehicle crime, but spatial and temporal displacement remains a concern. Journal of Quantitative Criminology, 39. https://doi.org/10.1007/s10940-022-09539-8

Trapletti, A., Hornik, K. (2019). tseries: Time Series Analysis and Computational Finance, r package version 0.10-47. URL https://CRAN.R-project.org/package=tseries

Tseng, P.-Y., Lin, P.-C., & Kristianto, E. (2023). Vehicle theft detection by generative adversarial networks on driving behavior. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 117, 105571. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105571

van Dijk, J., Nieuwbeerta, P., & Joudo Larsen, J. (2021). Global crime patterns: An analysis of survey data from 166 countries around the world, 2006-2019. Journal of quantitative criminology. Advance online publication. https://doi.org/10.1007/s10940-021-09501-0

Walleczek, J. (2000) Self-organized biological dynamics and nonlinear control: to- ward understanding complexity, chaos and emergent function in living systems. Cambridge University Press.

Zebende, G. F., Brito, A. A., & Castro, A. P. (2020). 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

Zebende, G. F., & da Silva Filho, A. M. (2018). Detrended multiple cross-correlation coefficient. Physica A, 510, 91–97. https://doi.org/10.1016/j.physa.2018.06.119

Zebende, G. F. (2011). DCCA cross-correlation coefficient: Quantifying level of cross-correlation. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 390(4), 614–618. https://doi.org/10.1016/j.physa.2010.10.022

# Referências Bibliográficas


ABBOTT, P.; BATTISTI, A. B. de. Recent Global Food Price Shocks: causes, consequences and lessons for African governments and donors. *Journal of African Economies*, Oxford University Press (OUP), v. 20, n. Supplement 1, p. i12–i62, apr 2011. 1.4

ALVIN, T. *O choque do futuro*. [S.l.]: Arte Nova, 1973. 1.1

ARFAOUI, N.; ROUBAUD, D.; NAEEM, M. A. Energy transition metals, clean and dirty energy markets: A quantile-on-quantile risk transmission analysis of market dynamics. *Energy Economics*, Elsevier BV, v. 143, p. 108250, mar. 2025. ISSN 0140-9883. 1.4, 2

BAK, P. *How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality*. [S.l.]: Copernicus, 1996. 2.1

BALCERZAK, A. P. et al. Towards cleaner energy transition: Small modular reactors as a feasible revolutionary step in the economics of nuclear energy. *Equilibrium. Quarterly Journal of Economics and Economic Policy*, Instytut Badan Gospodarczych / Institute of Economic Research, v. 20, n. 1, p. 35–47, mar. 2025. ISSN 1689-765X. 1.4

BAQUEDANO, F. G.; LIEFERT, W.; SHAPOURI, S. World market integration for export and food crops in developing countries: a case study for Mali and Nicaragua. *Agricultural Economics*, Wiley, v. 42, n. 5, p. 619–630, maio 2011. ISSN 0169-5150. 2.3

BERTALANFFY, L. V. *General System Theory: Foundations, Development, Applications*. New York: George Braziller, 1968. 2.1

BIELINSKYI, A. et al. Predictors of oil shocks. econophysical approach in environmental science. *IOP conference series. Earth and environmental science*, Bristol: IOP Publishing, v. 628, p. 12019, 2021. ISSN 1755-1307. 2.2

BIELINSKYI, A. et al. Econophysics of cryptocurrency crashes: an overview. *SHS Web of Conferences*, Les Ulis: EDP Sciences, v. 107, p. 3001, 2021. ISSN 2261-2424. 2, 2.3

BOCCARA, N. *Modeling Complex Systems*. Berlin: Springer Science, 2004. ISBN 978-1461426813. 1.1, 2, 2.1, 2.1

BOWKER, G. C.; STAR, S. L. *Sorting Things Out: Classification and Its Consequences*. [S.l.]: MIT Press, 2000. 2.1

BOX, G. E. P. et al. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. 5. ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2015. ISBN 978-1-118-09940-6. 2.4, 2.4

BOZKURT, M. A. Unveiling the dynamic interconnectedness of fossil fuels, clean energy, water, and technology assets. *Borsa Istanbul Review*, Elsevier BV, abr. 2025. ISSN 2214-8450. 1.4, 2

BRITO, A. A. *Modelagem Computacional de Auto-correlações e Correlações Cruzadas Aplicada em Variáveis Meteorológicas e Simuladas*. Tese (Doutorado) — SENAI-CIMATEC - Programa de pós graduação em modelagem computacional e tecnologia industrial, 2021. 2.4, 2.4, 2.4

BRITO, A. A. et al. Cross-correlation in a turbulent flow: Analysis of the velocity field using the $\rho_{DCCA}$ coefficient. *EPL (Europhysics Letters)*, IOP Publishing, v. 123, n. 2, p. 20011, aug 2018. 2.4

BRONDIZIO, E. S.; OSTROM, E.; YOUNG, O. R. Connectivity and the Governance of Multilevel Social-Ecological Systems: the role of social capital. *Annual Review of Environment and Resources*, Annual Reviews, v. 34, n. 1, p. 253–278, nov 2009. 1.4

CAPRA, F. *The Web of Life: A New Scientific Understanding of Living Systems*. New York: Anchor Books, 1996. 2.1

CHECKLAND, P. *Systems Thinking, Systems Practice*. Chichester: Wiley, 1981. 2.1, 2.1

DIAS, R. et al. Long memory in stock returns: Evidence from the Eastern European markets. *SHS Web of Conferences*, EDP Sciences, v. 91, p. 01029, 2021. 2.4

FASANYA, I. O.; ODUDU, T. F. Modeling return and volatility spillovers among food prices in Nigeria. *Journal of Agriculture and Food Research*, Elsevier BV, v. 2, p. 100029, dez. 2020. ISSN 2666-1543. 2, 2.3, 2.4

FENG, S.; LIU, H.; YANG, Y. Research on the Risk of the Online Lending Market in China: A New Perspective Based on MF-DCCA. *Emerging Markets Finance and Trade*, Informa UK Limited, v. 58, n. 7, p. 1860–1870, jun 2021. 1.1, 2.4, 2.4

FERREIRA, P.; LOURES, L. C. An Econophysics Study of the S&P Global Clean Energy Index. *Sustainability*, MDPI AG, v. 12, n. 2, p. 662, jan 2020. 1.4, 2.3

FERREIRA, P.; PEREIRA, E.; PEREIRA, H. From Big Data to Econophysics and Its Use to Explain Complex Phenomena. *Journal of Risk and Financial Management*, Basel: MDPI AG, v. 13, p. 153, 2020. ISSN 1911-8074. 2.2, 2.3

FERREIRA, P. et al. Detrended correlation coefficients between oil and stock markets: The effect of the 2008 crisis. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier BV, v. 517, p. 86–96, mar 2019. 2.4

FILHO, A. M.; SILVA, M. F. da; ZEBENDE, G. F. Autocorrelation and cross-correlation in time series of homicide and attempted homicide. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier BV, v. 400, p. 12–19, abr. 2014. 2.4

FILHO, A. M. S. et al. Statistical test for Multiple Detrended Cross-Correlation Coefficient. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier BV, v. 562, p. 125285, jan 2021. 1.1

FILHO, A. S. M. *Autocorrelação e correlação cruzada: Teorias e aplicações*. Tese (Doutorado) — SENAI-CIMATEC - Programa de Pós Graduação em modelagem computacional e tecnologia industrial, 2014. 2.4, 2.4, 2.4, 2.4

FRAEDRICH, K.; BLENDER, R. Scaling of Atmosphere and Ocean Temperature Correlations in Observations and Climate Models. *Physical Review Letters*, American Physical Society (APS), v. 90, n. 10, p. 108501, mar 2003. 2.4, 2.4

GALHARDO, C. et al. Detrended fluctuation analysis of a systolic blood pressure control loop. *New Journal of Physics*, IOP Publishing, v. 11, n. 10, p. 103005, oct 2009. 2.4

GELL-MANN, M. *The Quark and the Jaguar: Adventures in the Simple and the Complex*. New York: W. H. Freeman, 1994. 2.1

GHAZANI, M. M.; JAFARI, M. A. Cryptocurrencies, gold, and WTI crude oil market efficiency: a dynamic analysis based on the adaptive market hypothesis. *Financial Innovation*, Springer Science and Business Media LLC, v. 7, n. 1, abr. 2021. ISSN 2199-4730. 2.3

GRASS, I. et al. Land-sharing/-sparing connectivity landscapes for ecosystem services and biodiversity conservation. *People and Nature*, Wiley, apr 2019. 1.4

GRONWALD, T.; HOOS, O. Correlation properties of heart rate variability during endurance exercise: A systematic review. *Annals of Noninvasive Electrocardiology*, Wiley, v. 25, n. 1, sep 2019. 2.4

GUEDES, E. et al. Statistical test for $\Delta\rho_{DCCA}$ : Methods and Data. *Data in Brief*, jun. 2018. 1.1

GUEDES, E. et al. Statistical test for $\Delta\rho_{DCCA}$ Cross Correlation Coefficient. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, jul. 2018. 2.4

GUEDES, E. F. *Modelo computacional para análise de movimentos e comovimentos de mercados financeiros*. Tese (Doutorado) — SENAI-CIMATEC - Programa de pós graduação em modelagem computacional e tecnologia industrial, 2019. 1.1, 1.4, 2.4, 2.4

GUEDES, E. F. et al. DCCA cross-correlation in blue-chips companies: a view of the 2008 financial crisis in the eurozone. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier BV, v. 479, p. 38–47, aug 2017. 1.1, 2.4, 2.4

GUEDES, E. F. et al. An econophysics approach to study the effect of BREXIT referendum on European Union stock markets. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier BV, v. 523, p. 1175–1182, jun 2019. 1.1, 2, 2.2, 2.2, 2.3

GUO, Y.; HUANG, J.; CHENG, H. Multifractal features of metal futures market based on multifractal detrended cross correlation analysis. *Kybernetes*, Emerald, v. 41, n. 10, p. 1509–1525, out. 2012. ISSN 0368-492X. 2.3

HALL, C. J.; JORDAAN, A.; FRISK, M. G. Centuries of Anadromous Forage Fish Loss: consequences for ecosystem connectivity and productivity. *BioScience*, Oxford University Press (OUP), v. 62, n. 8, p. 723–731, aug 2012. 1.4

HAMILTON, J. D. *Time Series Analysis*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1994. ISBN 0-691-04289-6. 2.4, 2.4, 2.4

HAYTHORNTHWAITE, C. Social networks and Internet connectivity effects. *Information, Communication & Society*, Informa UK Limited, v. 8, n. 2, p. 125–147, jun 2005. 1.1

HERWARTZ, H.; SAUCEDO, A. Food oil volatility spillovers and the impact of distinct biofuel policies on price uncertainties on feedstock markets. *Agricultural Economics*, Wiley, v. 51, n. 3, p. 387–402, mar. 2020. ISSN 1574-0862. 2.3

HOLLAND, J. H. *Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity*. Reading: Addison-Wesley, 1995. 2.1, 2.1

HORVÁTH, I. An Initial Categorization of Foundational Research in Complex Technical Systems. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, v. 16, p. 89–105, 2015. 2.1

HOU, L.; PAN, Y. Evaluating the connectedness of commodity future markets via the cross-correlation network. *Frontiers in Physics*, Frontiers Media SA, v. 10, set. 2022. ISSN 2296-424X. 2.3

HURST, H. E. Long-term storage capacity of reservoirs. *Transactions of the American society of civil engineers*, American Society of Civil Engineers, v. 116, n. 1, p. 770–799, 1951. 1.1

JUST, M.; ECHAUST, K. Dynamic spillover transmission in agricultural commodity markets: What has changed after the COVID-19 threat? *Economics Letters*, Elsevier BV, v. 217, p. 110671, ago. 2022. ISSN 0165-1765. 2.3

KENDALL, M. G. A NEW MEASURE OF RANK CORRELATION. *Biometrika*, Oxford University Press (OUP), v. 30, n. 1-2, p. 81–93, jun 1938. 1.1

KIRLY, A.; JANOSI, I. M. Detrended Fluctuation Analysis of daily temperature records: Geographic dependence over Australia. *Meteorology and Atmospheric Physics*, Springer Science and Business Media LLC, v. 88, n. 3-4, p. 119–128, oct 2004. 2.4, 2.4

KOSCIELNY-BUNDE, E. et al. Indication of a Universal Persistence Law Governing Atmospheric Variability. *Physical Review Letters*, American Physical Society (APS), v. 81, n. 3, p. 729–732, jul 1998. 2.4

KRISTOUFEK, L. Measuring correlations between non-stationary series with DCCA coefficient. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier BV, v. 402, p. 291–298, may 2014. 2.3, 2.4

KRISTOUFEK, L.; FERREIRA, P. Capital asset pricing model in Portugal: Evidence from fractal regressions. *Portuguese Economic Journal*, Springer Science and Business Media LLC, v. 17, n. 3, p. 173–183, apr 2018. 1.1, 2.4

KRISTOUFEK, L.; VOSVRDA, M. Measuring capital market efficiency: Global and local correlations structure. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier BV, v. 392, n. 1, p. 184–193, jan 2013. 2.4

LADYMAN, J.; LAMBERT, J.; WIESNER, K. What is a Complex System? *European Journal for Philosophy of Science*, v. 3, p. 33–67, 2013. 1.1, 2, 2.1, 2.1

LØVSLETTEN, O. Consistency of detrended fluctuation analysis. *Physical Review E*, American Physical Society (APS), v. 96, n. 1, p. 012141, jul 2017. 2.4

LUHMANN, N. *Social Systems*. Stanford: Stanford University Press, 1995. 2.1

MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. C. *Análise de séries temporais*. Sã Paulo: Edgard Blucher, 2004. v. 1. 1.1, 2.4, 2.4, 2.4

MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. C. *Análise de séries temporais: modelos multivariados e não lineares*. Sã Paulo: Edgard Blucher, 2020. v. 2. 1.1, 2.4

MORIN, E. *Introduction à la pensée complexe*. Paris: Seuil, 2005. 2.1, 2.1, 2.1

NUNES, J. E. O. et al. Análise de grafos de visibilidade do mercado brasileiro de soja, milho e carne de frango. *Research, Society and Development*, Research, Society and Development, v. 10, n. 1, p. e39210111478, jan. 2021. ISSN 2525-3409. 2.3

OKORIE, D. I.; LIN, B. Stock markets and the COVID-19 fractal contagion effects. *Finance Research Letters*, Elsevier BV, v. 38, p. 101640, jan 2021. 2.2, 2.4

PAITAN, C. P.; VERBURG, P. Methods to Assess the Impacts and Indirect Land Use Change Caused by Telecoupled Agricultural Supply Chains: A Review. *Sustainability*, MDPI AG, v. 11, n. 4, p. 1162, feb 2019. 1.1

PAL, D.; MITRA, S. K. Time-frequency dynamics of return spillover from crude oil to agricultural commodities. *Applied Economics*, Informa UK Limited, v. 52, n. 49, p. 5426–5445, jul. 2020. ISSN 1466-4283. 2.3

PEARSON, K. Note on Regression and Inheritance in the Case of Two Parents. *Proceedings of the Royal Society of London*, v. 58, p. 240–242, 1895. 1.1

PENG, C. et al. Mosaic organization of DNA nucleotides. *Physical Review E*, United States, v. 49, n. 2, p. 1685–1989, 1994. 1.1, 2.4, 2.1

PENG, C. K. et al. Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time series. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, AIP Publishing, v. 5, n. 1, p. 82–87, mar 1995. 2.4

PESSOA, R. V. S. et al. Correlações em séries temporais de preços de frango, soja e milho. *Research, Society and Development*, Research, Society and Development, v. 10, n. 4, p. e20610414019, apr 2021. 2.4

PIMENTEL, D. et al. Food Versus Biofuels: Environmental and Economic Costs. *Human Ecology*, Springer Science and Business Media LLC, v. 37, n. 1, p. 1–12, jan. 2009. ISSN 1572-9915. 2.3

PODOBNIK, B. et al. Cross-correlations between volume change and price change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 106, n. 52, p. 22079–22084, dec 2009. 2.4, 2.4

PODOBNIK, B.; STANLEY, H. E. Detrended Cross-Correlation Analysis: A New Method for Analyzing Two Nonstationary Sime Séries. *Physical Review Letters*, American Physical Society (APS), v. 100, n. 8, p. 084102, feb 2008. 1.1, 2.4, 2.4, 2.4

QUINTINO, D. D.; BURNQUIST, H. L.; FERREIRA, P. J. S. Carbon Emissions and Brazilian Ethanol Prices: Are They Correlated? An Econophysics Study. *Sustainability (Basel, Switzerland)*, Basel: MDPI AG, v. 13, p. 12862, 2021. ISSN 2071-1050. 2, 2.2, 2.3

REBOREDO, J. C. Do food and oil prices co-move? *Energy Policy*, Elsevier BV, v. 49, p. 456–467, oct 2012. 1.4, 2.3

RODRIGUES, R. M. S. V. et al. Econophysics, State of the Science and Bibliographic Production: a Bibliometric Analysis. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, RGSA-Revista de Gestao Social e Ambiental, v. 18, n. 11, p. e010035, nov. 2024. ISSN 1981-982X. 2.2

ROSARIO, M.; EUGENE, S. *Introduction to Econophysics: Correlations and Complexity in Finance*. 1. ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 1999. v. 1. 1.1, 2, 2.1, 2.1, 2.1, 2.2, 2.2

SANTANA, T. P. et al. Effects of Interdependence and Contagion on Crude Oil and Precious Metals According to: A COVID-19 Case Study. *Sustainability*, MDPI AG, v. 15, n. 5, p. 3945, feb 2023. 1.1, 1.4, 2, 2.2, 2.4, 2.4, 2.4

SANTANA, T. P. et al. Interdependence and contagion effects in agricultural commodities markets: A bibliometric analysis, implications, and insights for sustainable development. *Equilibrium. Quarterly Journal of Economics and Economic Policy*, Instytut Badan Gospodarczych / Institute of Economic Research, v. 18, n. 4, p. 907–940, dez. 2023. ISSN 1689-765X. 2.2, 2.3

SANTANA, T. P. et al. A Study of The Market of Fat Ox and Corn in Bahia/Brazil Via Weighted Networks By $\rho_{DCCA}$ . *Revista de Gestão Social e Ambiental*, RGSA- Revista de Gestao Social e Ambiental, v. 18, n. 7, p. e07007, jun. 2024. ISSN 1981-982X. 2, 2.3

SCHAFFARCZYK, M. et al. Validity of the Polar H10 Sensor for Heart Rate Variability Analysis during Resting State and Incremental Exercise in Recreational Men and Women. *Sensors*, MDPI AG, v. 22, n. 17, p. 6536, aug 2022. 2.4

SHIN, K.-H.; LIM, G.; MIN, S. Dynamics of the Global Stock Market Networks Generated by DCCA Methodology. *Applied Sciences*, MDPI AG, v. 10, n. 6, p. 2171, mar. 2020. ISSN 2076-3417. 2.3

SILVA et al. Quantifying the contagion effect of the 2008 financial crisis between the G7 countries (by GDP nominal). *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier BV, v. 453, p. 1–8, jul 2016. 1.1, 2.2, 2.4, 2.2, 2.4, 2.3

SIMON, H. A. The Architecture of Complexity. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 1962. 2.1, 2.1

SOARES, A. P. A. *Análise de séries temporais: aplicações em economia*. [S.l.]: CRV, 2020. 1.1, 2.4, 2.4, 2.4

SPEARMAN, C. The proof and measurement of association between two things. *The American Journal of Psychology*, University of Illinois Press, v. 100, n. 3/4, p. 441, 1987. 1.1

SZOSTAK, R. Complex concepts into basic concepts. *Journal of Economic Methodology*, Taylor & Francis, v. 18, n. 2, p. 149–164, 2011. 2

WALLECZEK, J. (Ed.). *Self-Organized Biological Dynamics and Nonlinear Control*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2000. 2.4, 2.4

WILSON, B. *Systems: Soncepts, Methodologies, and Applications*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1991. 2.1

YUAN, X.; SUN, Y.; LU, X. SHIBOR Fluctuations and Stock Market Liquidity: An MF-DCCA Approach. *Emerging Markets Finance and Trade*, Informa UK Limited, v. 58, n. 7, p. 2050–2065, aug 2021. 1.1

ZEBENDE, G.; BRITO, A.; CASTRO, P. DCCA cross-correlation analysis in time-series with removed parts. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, p. 123472, 2019. ISSN 0378-4371. 2.4

ZEBENDE, G.; DIAS Rui Manoel Santos; AGUIAR Lázaro C. Stock market efficiency: An intraday case of study about the G-20 group. *Heliyon*, Elsevier BV, v. 8, n. 1, p. e08808, jan 2022. 1.1, 2.4, 2.4

ZEBENDE, G. F. DCCA cross-correlation coefficient: Quantifying level of cross-correlation. *Physica A*, v. 390, p. 614–618, 2011. 1.1, 2.4, 2.4, 2.4

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*, Oxford University Press (OUP), v. 464, n. 3, p. 2638–2642, oct 2016. 2.4

ZEBENDE, G. F.; FILHO, A. M. S. Detrended Multiple Cross-Correlation Coefficient. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier BV, v. 510, p. 91–97, nov 2018. 1.1

ZEBENDE, G. F.; SILVA, M. F. da; FILHO, A. M. DCCA cross-correlation coefficient differentiation: Theoretical and practical approaches. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier BV, v. 392, n. 8, p. 1756–1761, apr 2013. 2.4, 2.4

*Análise Espaço Temporal no Setor Energético, Metais Preciosos e Agropecuário*

Thiago Pires Santana

Feira de Santana, Outubro de 2025.