

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

ALONSO GONÇALVES AFONSO DE OLIVEIRA

**MODELO ECONOMÉTRICO PARA IDENTIFICAR ARBITRAGEM ESTATÍSTICA
NO MERCADO INTERNACIONAL DE CAFÉS ARÁBICA E ROBUSTA**

VARGINHA/MG

2025

ALONSO GONÇALVES AFONSO DE OLIVEIRA

**MODELO ECONOMETRICO PARA IDENTIFICAR ARBITRAGEM ESTATÍSTICA
NO MERCADO INTERNACIONAL DE CAFÉS ARÁBICA E ROBUSTA**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Economia pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Economia Aplicada.

Orientador: Prof. Dr. João Marcos Caixeta Franco

Coorientadora: Prof.^a Dra. Leticia Lima Milani Rodrigues

VARGINHA/MG

2025

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas
Biblioteca Campus Varginha

Oliveira, Alonso Gonçalves Afonso de.

Modelo econométrico para identificar arbitragem estatística no mercado internacional de cafés arábica e robusta / Alonso Gonçalves Afonso de Oliveira. - Varginha, MG, 2026.

54 f. : il. -

Orientador(a): João Marcos Caixeta Franco.

Dissertação (Mestrado em Economia) - Universidade Federal de Alfenas, Varginha, MG, 2026.

Bibliografia.

1. Café. 2. Cointegração. 3. Mercado futuro. 4. Arbitragem estatística.
5. Pair trading. I. Franco, João Marcos Caixeta, orient. II. Título.

Ficha gerada automaticamente com dados fornecidos pelo autor.

ALONSO GONÇALVES AFONSO DE OLIVEIRA

**MODELO ECONOMETRICO PARA IDENTIFICAR ARBITRAGEM ESTATÍSTICA
NO MERCADO INTERNACIONAL DE CAFÉS ARÁBICA E ROBUSTA**

O Presidente da banca examinadora abaixo assina a aprovação da Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Economia pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Economia Aplicada.

Aprovada em: 19 de dezembro de 2025

Prof. Dr. João Marcos Caixeta Franco

Presidente da Banca Examinadora

Universidade Federal de Alfenas

Prof.^a Dra. Letícia Lima Milani Rodrigues

Universidade Federal de Alfenas

Prof. Dr. Marcelo Lacerda Rezende

Universidade Federal de Alfenas

Prof. Dr. Alessandro Corrêa Victorino

Université de Technologie de Compiègne (UTC)

Trabalho dedicado aos amados Mateus M. de Oliveira
e Suely M. de Oliveira.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me permitir realizar este sonho de infância de me aventurar pelas águas agitadas da economia internacional. Agradeço à Suely, companheira e amiga, e ao Mateus, o amado filho da promessa.

O professor João Marcos e a professora Letícia foram fundamentais para que este projeto se concretizasse. Pude desfrutar de uma orientação amigável e enriquecedora. Agradeço a Deus por colocar vocês em meus caminhos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Agradeço ao Programa Institucional de Bolsas de Pós-Graduação (PIB-Pós) da Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL) assim como, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), que apoiaram essa pesquisa.

RESUMO

O tema central da pesquisa consiste na proposta de implementação de uma estratégia de arbitragem estatística, conhecida como *pairs trading*, aplicada especificamente ao mercado mundial dos cafés arábica e robusta. O trabalho se justifica como uma ferramenta para gerar lucro com riscos reduzidos, explorando oportunidades pontuais de arbitragem baseadas na premissa de correção da divergência na relação de equilíbrio de preços relativos. O objetivo geral é a identificação dos pares de séries temporais de ativos vinculados ao café que possuem uma relação de equilíbrio de longo prazo e a estimação de um modelo para selecionar os melhores pares para negociação. A importância da pesquisa está por situar-se na intersecção entre o avanço da área de finanças quantitativas e a necessidade de lidar com as incertezas de preços absolutos dos ativos do agronegócio, particularmente no mercado cafeeiro, tão importante para economia brasileira. Em vez de prever preços absolutos, o estudo utilizou a análise de preços relativos, *spread*, reduzindo substancialmente a volatilidade comum do mercado de café. A metodologia adotada foi de natureza quantitativa, utilizando métodos de análise estatística e econométrica. Utilizaram-se 8 séries temporais de dados de fechamento diário dos preços dos cafés arábica e robusta, negociados à vista no Brasil e nos mercados futuros da B3, ICE de Nova Iorque e de Londres, cobrindo o período de 2019 até junho de 2025. A metodologia baseou-se primeiramente na identificação dos pares cointegrados utilizando a metodologia de Engle-Granger. Para os pares validados, procedeu-se à construção de um Modelo de Correção de Erros (MCE) para identificar a força de reversão à média. O MCE permitiu o cálculo da meia-vida *half-life*, indicador crucial para ranquear a viabilidade dos pares, sendo o menor tempo de meia-vida o indicativo da maior força de reversão à média. Dos 28 pares analisados, foram identificados 11 pares cointegrados. Os testes confirmaram que setores diferentes, como o arábica e o robusta, tendem a não apresentar cointegração, ou seja, os ativos derivados destas espécies não possuem equilíbrio de preços de longo prazo. A análise resultou na identificação de 8 pares de café arábica e 3 pares para café robusta (conilon).

Palavras-chave: café; cointegração; mercado futuro; arbitragem estatística; *pair trading*.

ABSTRACT

The central theme of the research consists of proposing the implementation of a statistical arbitrage strategy, known as pairs trading, applied specifically to the global Arabica and Robusta coffee market. The work is justified as a tool for generating profit with reduced risks, exploring specific arbitrage opportunities based on the premise of correcting divergence in the relative price equilibrium relationship. The general objective of the project is the identification of pairs of time series of coffee-linked assets that have a long-term equilibrium relationship and the estimation of a model to select the best pairs for trading. The research qualifies by being situated at the intersection between the advancement of quantitative finance and the necessity to deal with the uncertainties of absolute prices of agribusiness assets, particularly in the coffee market, which is so important for the Brazilian economy. Instead of forecasting absolute prices, the study utilized relative price analysis, the spread, substantially reducing the common volatility of the coffee market. The methodology adopted was quantitative in nature, utilizing statistical and econometric analysis methods. Eight time series of daily closing prices for Arabica and Robusta coffees were used, traded spot in Brazil and in the futures markets of B3, ICE New York, and London, covering the period from 2019 until June/2025. The methodology was based primarily on identifying cointegrated pairs using the Engle-Granger methodology. For the validated pairs, an Error Correction Model (ECM) was constructed to identify the strength of mean reversion. The ECM allowed for the calculation of the *half-life*, a crucial indicator for ranking the viability of the pairs, with the shortest half-life time indicating the greatest strength of mean reversion. Of the 28 pairs analyzed, 11 cointegrated pairs were identified. The tests confirmed that different sectors, such as Arabica and Robusta, tend not to exhibit cointegration; that is, assets derived from these species do not have long-term price equilibrium. The analysis resulted in the identification of 8 Arabica coffee pairs and 3 Robusta (Conilon) coffee pairs.

Keywords: coffee; cointegration; futures market; statistical arbitrage; pair trading.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Relação de ativos a serem analisados.....	32
Quadro 2 - Vencimentos dos contratos futuros do café.....	33
Quadro 3 - Testes realizados.....	39
Quadro 4 - Pares que não apresentaram cointegração.....	42

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 -	Produção mundial de café em milhões de sacas de 60 kg entre os anos safra 2018/19 a 2023/24	17
Gráfico 2 -	Evolução percentual da participação do Brasil na produção total mundial de café arábica e robusta entre os anos safra 2020/21 a 2023/24.....	18
Gráfico 3 -	Preços do mercado do café arábica à vista no Brasil e futuro em Nova Iorque entre janeiro de 2019 a junho de 2025.....	35
Gráfico 4 -	Diferença (<i>spread</i>) dos preços do mercado do café arábica à vista no Brasil e futuro em Nova Iorque entre janeiro de 2019 a junho de 2025.....	36
Gráfico 5 -	Série de preços do café robusta em Londres e à vista no Brasil no período de 02/01/2019 a 31/05/2019.....	45
Gráfico 6 -	Diferença de preços (<i>spread</i>) do par contrato futuro em Londres 1 e Londres 2 do café robusta no período de 02/01/2019 a 31/05/2019	45
Gráfico 7 -	Z-score do par contrato futuro em Londres 1 e Londres 2 do café robusta no período de 13/02/2019 a 30/05/2019.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Capital imobilizado para negociação do contrato futuro.....	33
Tabela 2 - Estatística descritiva das séries temporais completas (US\$/saca).....	36
Tabela 3 - Teste de estacionariedade (ADF) para as séries completas(janeiro de 2019 a junho de 2025)	41
Tabela 4 - Testes dos resíduos dos pares integrados.....	42
Tabela 5 - Resultado da força de reversão a média dos pares cointegrados.....	44

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	O MERCADO INTERNACIONAL DE CAFÉ.....	16
2.2	PRECIFICAÇÃO DAS COMMODITIES DO CAFÉ	18
2.3	PREÇOS RELATIVOS	21
2.4	ARBITRAGEM ESTATÍSTICA E COINTEGRAÇÃO	23
2.4.1	Arbitragem estatística	23
2.4.2	Cointegração	25
2.4.3	Séries temporais estacionárias	26
2.4.4	Modelo de correção de erros (MCE)	28
3	METODOLOGIA	30
3.1	FONTE DE DADOS	31
3.2	ANÁLISE DOS DADOS	34
3.3	TESTE ENGLE-GRANGER.....	36
3.3.1	Teste de raiz unitária (ADF)	37
3.3.2	Identificação dos pares	38
3.4	MODELO DE CORREÇÃO DE ERROS (MCE)	39
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	41
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
	REFERÊNCIAS	50

1 INTRODUÇÃO

O café exerce uma importância significativa para a indústria agrícola brasileira, com o país ocupando posições de liderança na produção mundial das espécies arábica e robusta. Desde a oferta de emprego para milhares de brasileiros até a números expressivos na exportação, o mercado do café tem sido um dos pilares para a economia do Brasil. Apesar dessa pujança, o mercado é caracterizado por uma volatilidade extrema. Fatores como mudanças climáticas e variações na oferta mundial impactam severamente a produtividade das lavouras e, conseqüentemente, elevam a incerteza sobre os preços dos ativos.

A grande dificuldade reside na complexidade de prever os preços futuros e absolutos do café devido a inúmeras variáveis externas imprevisíveis. No entanto, observa-se que as alterações na oferta mundial tendem a gerar variações de preços em todos os mercados integrados simultaneamente. Diante disso, surge a oportunidade de analisar os preços relativos (spread) em vez dos preços absolutos. Ao focar na diferença de preços de um mesmo ativo em diferentes mercados, é possível reduzir substancialmente os reflexos de influências adversas de oferta e demanda, permitindo identificar oportunidades de lucro com riscos reduzidos.

É nesse contexto que esta pesquisa — Modelo econométrico para identificar arbitragem estatística no mercado internacional de cafés arábica e robusta — se consolida. Inserida na Área de Concentração de Economia Aplicada da Universidade Federal de Alfenas. O tema central da pesquisa consiste na proposta de utilização de técnicas econométricas na aplicação de métodos estatísticos rigorosos para analisar a dinâmica das séries temporais dos preços do café, permitindo que a teoria econômica seja testada mediante evidências empíricas especificamente ao mercado mundial dos cafés arábica e robusta.

A pesquisa se qualifica por situar-se no encontro entre o avanço da área de finanças quantitativas e a necessidade de lidar com as incertezas de preços absolutos dos ativos do agronegócio, particularmente no mercado cafeeiro, caracterizado por ampla volatilidade. Testar um modelo econométrico, de medidas e testes para previsão do mercado futuro do café, por meio de uma metodologia coesa e experienciada, é uma possibilidade de contribuição não apenas para o produtor de café, mas para o Brasil, como um dos países que lideram este mercado.

1.1 OBJETIVO E JUSTIFICATIVA

A construção de modelos de previsão de preços de ativos é um problema complexo em finanças. Porém, é possível obter modelos que preveem a dinâmica futura e permitem explorar essas previsões avaliando o preço relativo de ativos cointegrados. Para isso é possível a criação de ativos-sintéticos, que serão as séries temporais dos *spreads*, e assim a variância será reduzida e a tarefa de previsão será facilitada. Dessa forma, é possível identificar a arbitragem estatística, que faz parte de finanças quantitativas. Hogan *et al.* (2004) destacam quatro propriedades da estratégia de arbitragem estatística: (i) autofinanciada; (ii) expectativa de lucros positivos; (iii) probabilidade de perda que converge para zero e (iv) a média temporal da variância converge para zero.

O objetivo geral é a identificação dos pares das séries temporais de ativos vinculados ao café que possuem relação de equilíbrio de longo prazo. Em essência, o trabalho visa a proposta de implementação de uma estratégia de arbitragem estatística conhecida como *pairs trading*, aplicada especificamente ao mercado mundial dos cafés arábica e robusta, por meio da utilização de um modelo econométrico para gerar e explorar tais oportunidades.

Para alcançar o objetivo geral, o trabalho estabelece três objetivos específicos, que guiam a metodologia do estudo, que são, primeiro desenvolver um método para identificar pares, com base no referencial teórico de maior relevância no campo da pesquisa realizada, que possam ser utilizados na estratégia *pairs trading*. Este método é realizado através da identificação dos pares cointegrados a partir da metodologia de Engle-Granger. A cointegração é fundamental, ao indicar a existência de um equilíbrio de longo prazo entre duas ou mais séries temporais. Segundo, conduzir uma análise dos co-movimentos entre as séries buscando identificar a força de reversão à média. Este passo é executado pela construção de um Modelo de Correção de Erros (MCE) que permite ranquear os pares a serem negociados. O ranqueamento é feito com base no cálculo da meia-vida, *half-life*, que representa o tempo médio que o *spread* levará para retornar à metade do seu desvio após um choque, sendo um indicador crucial da força de reversão à média. Por fim, utilizar um modelo econométrico para a geração e exploração de oportunidades de arbitragem estatística, de maneira a avaliar as possibilidades de aplicação dessa técnica entre diferentes mercados do café. As séries temporais analisadas incluem dados de fechamento diário dos preços de café arábica e robusta, negociados à vista no Brasil e nos mercados futuros da B3, São Paulo, ICE de Nova Iorque e de Londres, cobrindo o período de 2019 até junho de 2025.

Stock e Watson (1988) apontam, que preços cointegrados possuem uma tendência

estocástica comum. Isto é, se duas ou mais séries são cointegradas, existe uma relação de equilíbrio de longo prazo entre elas. Muitas variáveis econômicas apresentam relações de equilíbrio, como preços de um mesmo produto em diferentes mercados. Estabelecida uma relação de equilíbrio de longo prazo entre os preços é possível ajustar um modelo que corrija desvios de curto prazo da relação de equilíbrio de longo prazo. Esse modelo é chamado modelo de correção de erros (MCE).

O estudo se justifica pelo ponto de contato entre o desenvolvimento da área de finanças quantitativas — favorecido pela disponibilidade de dados e o poder computacional — e as incertezas de preços absolutos dos ativos do agronegócio. O agronegócio possui relevância histórica na geração de renda, emprego e divisas para o Estado brasileiro, a partir de recorrentes superávits na balança comercial. O Brasil está entre as lideranças mundiais da produção de diversas *commodities* (mercadorias, bens primários) agrícolas, com destaque para os cafés das espécies arábica e robusta, também conhecido como conilon. Porém, inúmeros fatores de elevada importância na produtividade agrícola, com potencial de alteração da oferta, podem consequentemente impactar os preços dos ativos. Conforme dados do Conselho Nacional do Café, Oliveira (2025), no ano de 2024 o Brasil exportou 50,5 milhões de sacas de café, o que gerou uma receita de US\$ 12,3 bilhões. A relevância dessa atividade para o Brasil se traduz na geração de divisas por exportação e no emprego de mais de 8 milhões de pessoas, de forma direta e indireta. Ao passo das incertezas relativas à produção, observa-se o avanço exponencial das finanças quantitativas no mercado de capitais.

A dificuldade de prever os preços futuros do café acontece por inúmeros fatores, que podem gerar alterações substanciais. Por exemplo, as mudanças climáticas são uma realidade, existe uma dificuldade na previsão de quando e onde irão ocorrer. Variações climáticas extremas impactam na produtividade das lavouras e consequentemente nos preços, já que reduzem a produção, isto é, a oferta de café no mercado mundial. Contudo, a partir de uma análise de preços relativos, isto é, o *spread* ou diferença de preços do mesmo ativo em diferentes mercados, é possível avaliar oportunidades pontuais de arbitragem, que podem ser lucrativas, com riscos reduzidos, já que as alterações de oferta mundial de determinado ativo tendem a gerar uma variação de preços em todos os mercados integrados mundialmente. Portanto, os preços relativos reduzem substancialmente os reflexos das influências adversas na oferta e demanda dos ativos.

É diante desse cenário de alta instabilidade e dificuldade de predição de valores absolutos que a avaliação de arbitragem estatística se torna relevante. A estratégia proposta foca na análise de preços relativos, *spread*, ou diferença de preços entre ativos, em vez dos preços

absolutos, reduzindo substancialmente a volatilidade comum do mercado de café.

Portanto, o trabalho se justifica como uma ferramenta para geração de lucro com proteção contra as volatilidades do mercado. Ele propõe explorar oportunidades pontuais de arbitragem com riscos reduzidos, baseando-se na premissa de que a divergência na relação de equilíbrio de preços relativos tende a ser corrigida no futuro.

Para tal, este trabalho é dividido em quatro partes. Primeiro se registra o referencial teórico sobre o mercado internacional do café, a estratégia de arbitragem estatística e, por fim, as ferramentas econométricas utilizadas nessa estratégia. Logo, são apresentados os dados a serem utilizados e a metodologia de construção dos modelos através da identificação dos pares cointegrados a partir da metodologia de Engle-Granger e a construção de um modelo de correção de erros (MCE) que permite identificar os pares com maior força de reversão à média. Ainda, há uma seção reservada à análise dos resultados obtidos desta pesquisa. Por fim, as considerações finais são registradas, comparando com outros projetos já realizados no mesmo âmbito, na de oportunidades de ampliação da pesquisa e melhorias nos modelos apresentados.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção visa fornecer o embasamento conceitual necessário para a implementação da estratégia de arbitragem estatística e o modelo econométrico proposto. Inicia-se com a contextualização do mercado internacional de café, destacando a relevância das espécies arábica e robusta, com base nos estudos de Schnaider e Saes (2013) e dados da Organização Internacional do Café, ICO (2025). Em seguida, se faz o registro sobre a precificação das *commodities* do café, examinando os diversos fatores que contribuem para a volatilidade dos preços, conforme abordado por autores como Barreto e Zugaib (2016) e Schouchana, Sheng e Decotelli (2013).

O cerne teórico se aprofunda na análise de preços relativos e na arbitragem estatística e cointegração, fundamentando-se na Lei do Preço Único (LPU), formalizada por Ingersoll (1987) e discutida em termos de integração de mercado por Chen e Knez (1995) e Facler e Gppdwin (2001). A estratégia de *pairs trading* é definida com base nos trabalhos de Hogan *et al.* (2024) e Gatev, Goetzmann e Rouwenhorst (2006), que detalham as propriedades da arbitragem estatística.

A base econométrica do trabalho, crucial para a identificação e ranqueamento dos pares negociáveis, é estabelecida através da análise de séries temporais estacionárias, com o uso dos testes de raiz unitária Dickey e Fuller (1979, 1981), o conceito de cointegração, introduzido por Granger (1981) e formalizado pela metodologia de Engle e Granger (1987), que identifica a relação de equilíbrio de longo prazo entre as séries e o Modelo de Correção de Erros (MCE) utilizado para calcular a velocidade de reversão à média, *half-life*, conforme metodologia aplicada por Caldeira e Moura (2013).

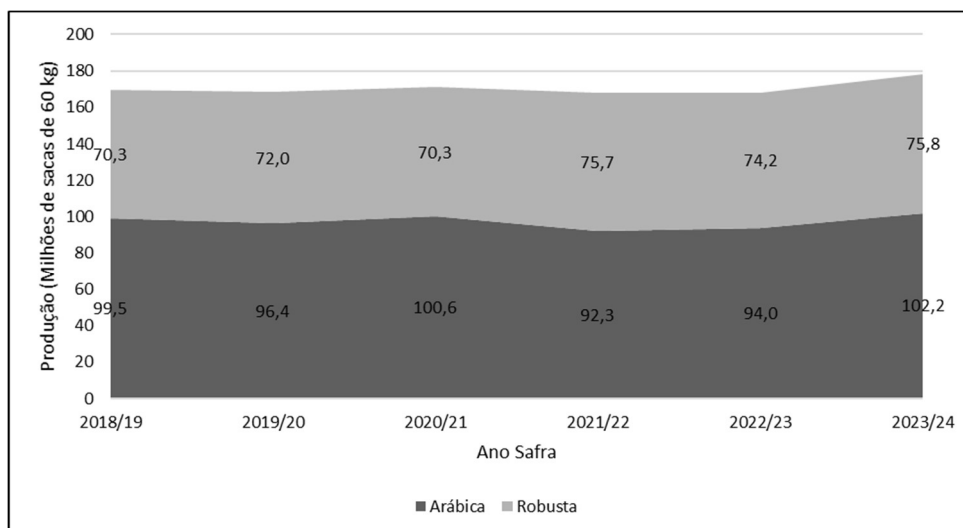
2.1 O MERCADO INTERNACIONAL DE CAFÉ

De acordo com Schnaider e Saes (2013) as espécies de cafés arábica e robusta são as que possuem maior relevância econômica no mercado internacional do café. O café robusta tem sabor mais amargo e forte e menos valorizada no mercado. Porém, é mais produtivo e possui maior resistência às pragas, sendo o Vietnã um dos principais produtores. Já a espécie arábica possui aroma agradável e é o mais valorizado no mercado, além disso, é a espécie mais comercializada mundialmente e pode ser dividida conforme o beneficiamento do grão pós-colheita em:

1. Arábica tipo natural: o Brasil é o maior ofertante. Seu processo de beneficiamento é por via seca, isto é, secagem ao sol.
2. Arábica suave: a Colômbia é a principal produtora. Seu processo de beneficiamento é em via úmida, que gera um produto considerado de maior qualidade e comercializado a preços mais elevados.

O Gráfico 1 a seguir mostra a evolução da produção mundial dos cafés arábica e robusta entre os anos safra de 2018/19 a 2023/24. Conforme a Organização Internacional do Café ICO (2025) registra, o Brasil é o líder mundial de produção da espécie arábica. Já a produção de robusta o Vietnã é líder mundial.

Gráfico 1 – Produção mundial de café em milhões de sacas de 60 kg entre os anos safra 2018/19 a 2023/24



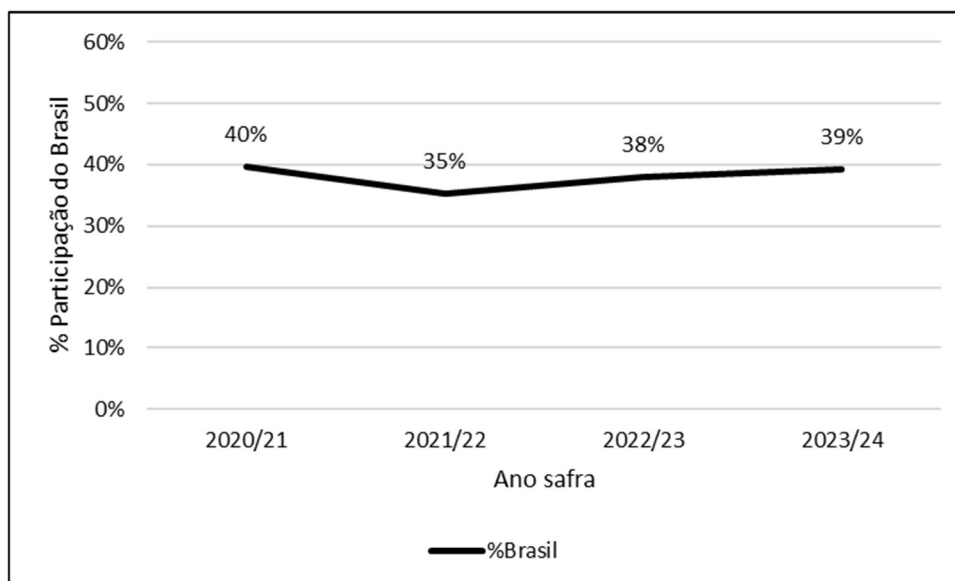
Fonte: ICO (2025).

Investimento em tecnologia propicia o aumento das vendas do café robusta. Saes e Farina (1999) afirmam que as grandes processadoras desenvolveram a tecnologia de vaporização, que neutraliza o impacto do sabor da espécie robusta e permite que ela seja incorporada ao *blend* (combinação) sem que ocasione alterações no sabor. Sendo assim, o menor preço do café robusta e a tecnologia de vaporização permitiram que as processadoras substituíssem o café arábica pelo robusta na composição do *blend*, de acordo com Schnaider e Saes (2013). Isto é, buscando a maximização do lucro, as processadoras alteram a composição do *blend* entre duas variedades de café, conforme as variações nos preços observadas para cada uma delas.

Mesmo nesse cenário, a produção cafeeira no Brasil ainda é destaque mundial. Conforme dados da ICO (2025), em 1997 o Brasil foi responsável por 19% da produção

mundial de café. Já em 2020, após aumento de mais 70% da produção mundial, a participação do Brasil subiu para quase 37%, mesmo com redução de aproximadamente 20% da área de cultivo. Dessa forma, o Brasil ocupa posição privilegiada entre as lideranças mundiais da produção café. O Gráfico 2 evidencia a evolução da participação brasileira como o líder da produção total, isto é, a soma de café arábica e robusta, sustentando a liderança histórica conforme dados do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, USDA (2025).

Gráfico 2 – Evolução percentual da participação do Brasil na produção total mundial de café arábica e robusta entre os anos safra 2020/21 a 2023/24.



Fonte: USDA (2025).

A safra de café no Brasil para o ano 2024 foi estimada em 54,2 milhões de sacas de 60 kg. Desse montante, a produção de arábica corresponde a 39,6 milhões de sacas de café beneficiado. A produção do robusta (conilon), corresponde a 14,6 milhões de sacas, CONAB (2025). A maior parte desta produção é destinada ao mercado externo. No ano de 2024 a exportação foi 50,5 milhões de sacas, o que gerou uma receita de US\$ 12,3 bilhões. A relevância da atividade para o Brasil se traduz na geração de divisas por exportação e no emprego de mais de 8 milhões de pessoas, de forma direta e indireta, Oliveira (2025).

2.2 PRECIFICAÇÃO DAS COMMODITIES DO CAFÉ

O café é indiscutivelmente um produto de importância econômica mundial. De acordo com Vilela e Penedo (2023) “a maior parte do café produzido no mundo é comercializada como *commodity*” (p.103). No Brasil, as exportações de *commodities* agrícolas estão entre os

principais geradores de receitas para o país. Em 2014 o Brasil exportou 1,99 milhões de toneladas de café. Já em 2024 esse valor chegou a 2,77 milhões de toneladas de café, que representa em 10 anos um aumento de 70% no volume de exportações de café, conforme dados da Secretaria do Comércio Exterior (SECEX) (2025).

Alguns especialistas definem o que são *commodities*, na perspectiva econômica. Ferraz, Kupfer e Haguenaer (1995), definem *commodities* como bens homogêneos ou indiferenciados, produzidos e comercializados em grande escala por processos contínuos, e estocados com relativa facilidade. Já Copeland, Weston e Shastri (1998) argumentam que os mercados de *commodities* são sujeitos a um maior número de negociações, já que devido à padronização, as partes negociantes conhecem as características das mercadorias negociadas, resultando em maior liquidez. Dessa forma, as transações são facilitadas nacional e internacionalmente em bolsa de valores.

Quanto a precificação do café, Hall e Lieberman (2003), concordam que o modelo de oferta e demanda explica como os preços são determinados em um sistema de mercado. A partir disso, Dias e Silva (2015) argumentam que a relação entre oferta e demanda internacionais de café são cruciais na determinação dos preços. Ou seja, uma redução de safra, resultado de eventos climáticos, pode incorrer na elevação dos preços. Barreto e Zugaib (2016) destacam alguns fatores com impacto na cotação: produção, consumo e o estoque. Vale ressaltar que fatores como os movimentos especulativos no mercado, também podem impactar os fundamentos dos preços.

Um dos fatores que impactam no preço das *commodities* é a armazenagem, que Williams e Wright (2005) destacam que ela é um mecanismo para lidar com a volatilidade associada à produção agrícola. O poder de armazenagem permite ao produtor definir o melhor momento de venda, conforme cotação, além de programar as vendas no mercado futuro. Nessa perspectiva, Corsini e Ribeiro (2008) enfatizam o papel dos estoques mundiais na determinação do preço, já que eles sinalizam riscos de escassez ou sobra da *commodity* em relação à demanda.

Além disso, as expectativas sobre a produção e a taxa de câmbio possuem importante relevância na precificação da *commodity*, em determinados momentos superando a influência dos preços históricos. Assim, a utilização da previsão do mercado futuro do café arábica e robusta proporciona, na tomada de decisão do produtor e comerciante cafeeiro, uma importante ferramenta de planejamento operacional e financeiro.

Dentre os riscos aos quais os produtores do agronegócio está expostos, Schouchana, Sheng e Decotelli (2013) destacam os riscos do próprio negócio, os efeitos climáticos, a oferta e demanda desequilibradas e os riscos que atingem toda a economia, como o câmbio e a taxa

de juros. Dessa forma, há uma variação no preço e conseqüentemente na rentabilidade dos agentes envolvidos na produção e comercialização.

As incertezas envolvendo fatores climáticos, biológicos e de produtividade são grandes na produção cafeeira, com potencial de alteração da oferta e conseqüentemente nos preços dos ativos. Berhane *et al.* (2019) afirmam que o mercado de café é inerentemente instável e caracterizado por ampla volatilidade nos preços. Dessa forma, impactando diretamente os agentes envolvidos no mercado de café.

Para que o produtor cafeeiro possa lidar com as adversidades, Rodrigues *et al.* (2018), sugere que é necessária uma gestão moderna do agronegócio, a qual deve incorporar instrumentos para controle de riscos visando amenizar tais incertezas e conferir uma estabilidade mínima ao produtor. Os instrumentos potenciais para lidar com a vulnerabilidade das *commodities* agrícolas, de modo geral, está a ferramenta de percepção dos mercados futuros e de opções.

A exemplo disso estão os contratos futuros, os quais Hull (1996) define como compromissos de compra ou venda de um determinado ativo numa data pré-estabelecida e a um preço (cotação) que reflete as forças de oferta e demanda que atuam naquele momento. Nesses mercados, os produtores podem comprar insumos ou vender sua produção antecipadamente visando fixar o preço desejado e se proteger contra oscilações.

Entretanto, a CNA (2018) apurou que, no Brasil, 64% dos produtores de café não realizam a venda futura da produção, com a alegação de desconhecimento. Porém, conforme Rodrigues *et al.* (2018) uma das tarefas cruciais para o gerenciamento de riscos é a previsão de preços dos produtos agrícolas, fator importante para todo o processo de tomada de decisão.

Para Ribeiro, Sosnoski e Oliveira (2010) a análise do comportamento de preços, como elemento do mecanismo de troca, reveste-se de fundamental importância para os participantes do mercado agrícola, sejam eles compradores, vendedores ou estejam em busca de proteção, *hedge*.

Ainda sobre mercado futuro do café, Junqueira (2005) e Ribeiro, Sosnoski e Oliveira (2006) afirmam que o ele é considerado uma das melhores diversificações de carteira. Para que isso seja realmente eficaz, utilizar métodos econométricos para a devida previsão de preços é um importante diferencial. Sobre esses modelos, alguns autores como Miranda, Coronel e Vieira (2013), Coelho *et al.* (2008) e Santos (2008) destacam que os modelos econométricos mais utilizados para a previsão de *commodities* são o ARIMA (Autorregressivo integrado com Médias Móveis) e a família de modelos GARCH (Heterocedasticidade Condicional Autorregressiva Generalizada).

Essa previsão, segundo Gutierrez e Almeida (2013), no caso do preço do café, é um parâmetro para tomada de decisão e pode auxiliar produtores e comerciantes. Os estudos das séries temporais dos preços do café fazem parte dessas ferramentas de predição, que podem basear as tomadas de decisões e reduzir os riscos nos ambientes dos negócios e investimentos.

Porém, o esforço envolvendo a predição do preço absoluto do café em determinado local ou mercado, em muitos momentos, possuem baixo êxito. Gutierrez e Almeida (2013) identificaram uma quebra estrutural nos preços reais e, em particular, uma dependência com a taxa de câmbio. Isto é, além da volatilidade da produção e demanda, adiciona-se o ambiente macroeconômico que possui impacto direto no câmbio, potencializando efeitos nos preços.

É exatamente nessa conjuntura que a avaliação de arbitragem estatística, isto é, avaliação de preços relativos ao invés de absolutos, no mercado de café arábica e robusta se mostra relevante, como uma ferramenta para geração de lucro com a devida proteção contra as volatilidades do mercado. Aqui se disserta sobre estudos que buscaram entender a integração do mercado mundial de café, a partir de técnicas de cointegração, tais como Schnaider e Saes (2013), Melawanki, Pradeepa Babu e Vedamurthy (2025), Cunha *et al.* (2008) e Baptista (2015).

2.3 PREÇOS RELATIVOS

Apesar de haver inúmeros estudos e ferramentas que buscam a previsão de preços em séries financeiras, é muito comum variações que extrapolam os limites esperados que podem incorrer em elevados riscos e possíveis prejuízos. Porém, esta pesquisa apresenta uma estratégia que a previsão é referente a preço relativo de dois ativos. Gatev, Goetzmann e Rouwenhorst (2006) diferencia duas formas de precificação de ativos. Primeiramente, a precificação absoluta, baseada na análise fundamentalista, tal como o fluxo de caixa descontado. Sendo um processo complexo e com ampla margem de erro. Já a precificação relativa é um pouco mais simples, já que a partir da avaliação de ativos correlacionados é possível estudar a variação dos preços, *spread*, ao invés do preço absoluto, ao longo do tempo.

Nesse viés, o trabalho de Ingersoll (1987) contribui de maneira fundamental na formalização da Lei do Preço Único (LPU) para aplicação na teoria moderna de finanças. A LPU pode ser entendida como ativos similares que deveriam ser vendidos pelo mesmo preço em diversos locais. Porém, Chen e Knez (1995) argumentam que “mercados estritamente integrados devem atribuir que preços com retornos semelhantes que sejam próximos.”(p.288) “tradução própria”. Isto é, uma condição mais fraca, ou também chamada quase LPU, pois os

preços não são necessariamente iguais, mas devem ser semelhantes. Santos *et al.* (2007) esclarecem que na ausência de barreiras comerciais, o processo de arbitragem garantirá que os preços de um bem homogêneo em dois países, expressos em moeda comum, não podem diferir em valor superior aos custos de transação.

A teoria de integração de mercados se baseia na LPU. De acordo com Fackler e Gppdwin (2001) quando os mercados apresentam interdependência de seus preços e havendo compartilhamento das mesmas informações de longo prazo, são considerados mercados integrados espacialmente. Quando há divergência de preços, eles tendem a ser corrigidos no curto prazo por operações de arbitragem. Sendo assim, a integração de mercados avalia as variações de preços de um bem em diferentes locais.

Para a cointegração, Harris (1995), apresenta a interpretação econômica de que se duas séries possuem uma relação de equilíbrio de longo prazo, então mesmo que as séries possam conter tendências estocásticas, elas irão mover-se juntas no tempo e a diferença entre elas será estável. Essa interpretação reforça a ligação entre o conceito de cointegração e a estratégia de arbitragem estatística, já que as séries financeiras normalmente apresentam tendências estocásticas, isto é, não são estacionárias. Porém, muitas delas possuem relação de equilíbrio de longo prazo, e dessa forma a diferença dessas duas séries produz uma série estacionária conhecida como *spread*. Em outras palavras, o conceito de cointegração indica a existência de um equilíbrio de longo prazo entre duas ou mais séries temporais.

Ainda sobre preço relativo, Caldeira (2013) afirma que “em mercados eficientes, a precificação com base no modelo CAPM (*Capital Asset Pricing Model*) e a LPU requer preços próximos para ativos equivalentes ao longo do tempo”(p.529). Portanto, o preço relativo, isto é, o *spread* de preços deve obedecer a um equilíbrio estável ao longo do tempo, sobretudo, quando ocorrer um desvio significativo em relação ao equilíbrio de longo prazo, surgem as oportunidades de arbitragem.

Este trabalho implementa uma estratégia de arbitragem estatística baseado na cointegração. Dessa forma, anomalias nos preços relativos são identificadas para negociação. Nesse contexto, esta pesquisa pode ser vista como um teste de LPU e quase LPU, conforme Gatev, Goetzmann e Rouwenhorst (2006), para o mercado internacional de café. A aplicação do conceito de cointegração para lidar com a LPU e com as ineficiências dos mercados possui uma ampla discussão acadêmica, dos quais se destacam: Karbuz e Jumah (1995), Gatev, Goetzmann e Rouwenhorst (2006), Caldeira e Moura (2013) e Baptista (2015).

2.4 ARBITRAGEM ESTATÍSTICA E COINTEGRAÇÃO

2.4.1 Arbitragem estatística

O início da arbitragem estatística é atribuída por Vidyamurthy (2004) ao início da década 1980, com destaque ao momento que o *trader* (profissional que realiza operações de compra e venda de ativos financeiros no mercado) quantitativo chamado Nunzio Tartaglia, no banco Morgan Stanley. Ele selecionou uma equipe de matemáticos, físicos e cientistas da computação para desenvolver modelos para negociação automatizada no mercado. Uma das estratégias de investimento empregadas pelo grupo envolvia a negociação com pares de ações, tal estratégia ficou conhecida como *pairs trading*. Obtiveram um lucro de aproximadamente US\$ 50 milhões em 1987, porém após dois anos subsequentes de prejuízo, o grupo foi desfeito. Vários integrantes do grupo continuaram atuando no mercado e a estratégia *pairs trading* se popularizou principalmente entre os gestores de *hedge-funds* (fundos de cobertura ou fundos especulativos).

Na mesma estratégia, Gatev, Goetzmann e Rouwenhorst (2006) exemplificam a história de David Shaw, um cientista de computação, que trabalhou com Tartaglia, e saiu para montar a própria empresa, a D.E. Shaw em 1988. Ele iniciou com 6 funcionários e US\$ 28 milhões de capital e em setembro de 2025 já contava com mais de 2 mil e quinhentos funcionários e administra mais do que US\$ 70 bilhões em capital e investimentos de acordo com D.E.Shaw (2025).

Ainda, sobre o termo arbitragem estatística, Krauss (2016) afirma que pode ser conhecido como “negociação de pares de arbitragem estatística”, “negociação de pares” e “*long-short*” (p.2), “tradução própria”. De acordo com Gatev, Goetzmann e Rouwenhorst (2006), que são referência sobre o assunto, o conceito de negociação de pares pode ser resumido em duas etapas. Inicialmente se parte da identificação de dois títulos que os preços se movem juntos historicamente. Posteriormente acompanhe o *spread* entre eles, quando houver divergência da relação de equilíbrio iniciam-se as oportunidades de negociação. Hogan *et al.* (2004) definem uma estratégia de arbitragem estatística em quatro condições:

- i. Custo inicial zero;
- ii. Lucro esperado positivo;
- iii. Probabilidade de perda converge para zero;
- iv. Variância converge para zero se a probabilidade de perda não vai para zero em tempo finito. Ou seja, se existe probabilidade de prejuízo.

Para Caldeira e Moura (2013) *pairs trading* envolve a venda de uma ação relativamente sobrevalorizada e a compra de outra subvalorizada com a ideia de que a distorção nos preços irá corrigir no futuro. Sendo que o *spread*, isto é, a diferença entre os preços das ações, irá variar ao longo do tempo e convergir para a média histórica, momento em que a posição será encerrada.

Ainda sobre o tema, Krauss (2016) realizou uma ampla revisão bibliográfica baseada em 90 estudos sobre arbitragem estatística e categorizou cinco correntes relevantes de literatura sobre o assunto. São eles:

- 1) Abordagem da distância — abordagem foi introduzida pelo artigo seminal de Gatev, Goetzmann e Rouwenhorst (2006). Ele estudou os dados diários de todas as ações líquidas dos Estados Unidos de 1962 a 2002 e identificou 20 pares principais com métrica de distância histórica mínima no período de seis meses. Normalizou o *spread* e as negociações foram abertas quando o *spread* desviou mais de dois desvios padrões do histórico e encerradas quando revertida a média.
- 2) Abordagem da cointegração — Nessa abordagem, testes de cointegração são aplicados para identificar os pares, por exemplo, com método Engle-Granger ou o método de Johansen (1988). No período de negociação, algoritmos simples são usados para gerar sinais de negociação. O trabalho mais citado dessa abordagem foi desenvolvido por Vidyamurthy (2004). É importante destacar também o trabalho de Caldeira e Moura (2013), que utilizaram os testes de cointegração de Engle-Granger e Johansen (1988) para identificar os pares de ações na bolsa de valores de São Paulo, no período de janeiro de 2005 até outubro de 2012. Assim, como Gatev, Goetzmann e Rouwenhorst (2006) usou o *spread* normalizado para calcular os pontos de entrada e saída das negociações.
- 3) Abordagem de séries temporais — Elliott, Van Der Hoek e Malcolm (2005) são os autores de maior relevância nessa abordagem. Eles modelaram a série temporal do *spread* com uma cadeia de Markov Gaussiana de reversão à média. Sendo que eles utilizaram o processo conhecido como processo de Ornstein-Uhlenbeck para calcular a velocidade de reversão à média da série temporal. Bertram (2010), Cummins e Bucca (2012) e Kim (2011) utilizam o processo Ornstein-Uhlenbeck no contexto da negociação de pares.
- 4) Abordagem de controle estocástico — Essa abordagem procura identificar as posições dos portfólios ideais em comparação com outros ativos disponíveis. Jurek e Yang (2007) apresentam o artigo de maior impacto nesse domínio, avaliando dois cenários. O primeiro a partir da modelagem da dinâmica de precificação de ativos com o processo

Ornstein-Uhlenbeck para avaliar um *spread* de reversão a média e o outro cenário em um ativo livre de risco. Já Parreiras (2007) utiliza uma modelagem dinâmica de preços de ativos baseada no modelo de correção de erros (MCE).

- 5) Outras abordagens — Há muitos outros estudos relevantes que podem ser destacados, a abordagem de aprendizado de máquina e previsões combinadas, com referência aos trabalhos de Huck (2009, 2010), que utilizou redes neurais de Elman para gerar previsões de retorno de uma semana à frente. Além da abordagem por cópula aprofundada por Ferreira (2008), Liew e Wu (2013) e Stander, Marais e Botha (2013).

As abordagens listadas acima, são linhas de pesquisa, que se conectam em vários estudos sobre arbitragem estatística, abordagem que possui como elemento principal a definição dos pares de negociação. Isto é, pares que possuam relação de equilíbrio de longo prazo e, portanto, possam reverter a média de longo prazo após desequilíbrios de curto prazo. Diante disso, é fundamental o estudo sobre a ferramenta estatística de cointegração.

2.4.2 Cointegração

O fundamento da arbitragem estatística é a definição dos pares para negociação, os quais precisam ser pares de ativos, que podem apresentar preços diferentes, mas que oscilem em sincronismo. Vidyamurthy (2004) apresenta uma tentativa de parametrizar estratégias de arbitragem estatística explorando a possibilidade de cointegração. Isto é, duas séries temporais, possuem uma relação estatística que são integradas de mesma ordem, d , podem ser combinadas linearmente e obter um resíduo estacionário.

Para a avaliação das relações entre séries temporais de variáveis econômicas, o conceito de cointegração, introduzido por Granger (1981) é muito relevante. Já que grande parte dessas séries são não estacionárias e utilizá-las nos modelos de regressão, pode gerar resultados espúrios. A regressão espúria consiste em aceitar a existência de uma relação entre séries quando ela não existe.

Assim, a ideia básica de cointegração é a de que cada uma das séries que compõem um vetor, Y_t , pode ser não estacionária, mas alguma combinação linear delas é estacionária. Desde Granger (1981), vários estudos sobre este assunto foram desenvolvidos, sendo que o mais relevante na literatura é o apresentado por Engle e Granger (1987).

A cointegração implica que o vetor de desvios do equilíbrio, ε_t , geralmente chamado de erro cointegrante, é estacionário com variância finita, mesmo que as séries sejam não estacionárias e com variância infinita, Engle e Granger (1987). Portanto, eis um exemplo com

duas séries, $\{y_t : t = 0, 1, \dots\}$ e $\{x_t : t = 0, 1, \dots\}$, cointegradas de ordem CI(1,1), então estas são I(1) e $\varepsilon_t \sim I(0)$. Assim, para estimar a relação de equilíbrio de longo prazo segue o modelo estático:

$$y_t = \beta_0 + \beta_1 x_t + \varepsilon_t \quad (1)$$

Uma estimativa consistente dessa relação pode ser obtida utilizando-se o método de mínimos quadrados ordinários (MQO) e todas as questões dinâmicas e de endogeneidade podem ser ignoradas assintoticamente pelo tamanho da amostra. Isto ocorre devido à propriedade de superconsistência (Harris, 1995) do estimador MQO, quando as séries são cointegradas. Diz-se que se y e x são cointegrados chama-se β_1 de parâmetro de cointegração.

Outra metodologia muito utilizada é o procedimento proposto por Johansen (1988). Apesar de ser mais complexo em termos teóricos e computacionais, tem como vantagem identificar, nos casos em que se tenha mais do que duas séries, quantos vetores de cointegração existem entre as variáveis, enquanto o teste de Engle e Granger (1987) somente indica se há ou não cointegração. Portanto, o primeiro passo é a definição se elas são estacionárias ou não.

2.4.3 Séries temporais estacionárias

Métodos clássicos de estimação utilizados em trabalhos econométricos aplicados são baseados nas suposições de que médias e variâncias são constantes bem definidas e independentes do tempo. Entretanto, a partir de testes de raízes unitárias nem sempre essas suposições são atendidas. A presença de raiz unitária em uma série está intimamente relacionada com o conceito de estacionariedade. Intuitivamente diz-se que uma série é estacionária quando esta se desenvolve no tempo de forma constante.

A característica de não estacionariedade é frequentemente observada em estudos de séries temporais. Um procedimento bastante comum, para se prosseguir com a análise deste tipo de série é a diferenciação, que tem por objetivo torná-la estacionária e assim aplicar modelagens conhecidas na análise de séries estacionárias, como, por exemplo, a utilização dos modelos ARIMA(p, q) de Box e Jenkins (1976) e avaliações de cointegração entre séries, conforme introduzido por Engle e Granger (1987).

Séries temporais podem ter tanto componentes estocásticos quanto determinísticos. Por exemplo, uma série com uma tendência determinística e um componente estocástico de ruído branco pode ser denotada por:

$$y_t = \alpha + \beta_t + \varepsilon_t, t = 1, 2, \dots, \quad (2)$$

onde $\varepsilon_t \sim iid(0, \sigma^2)$.

A maior parte dos modelos de séries temporais em finanças vai ter um componente estocástico, e assim se pode calcular tanto sua esperança não-condicionada quanto a variância da t -ésima observação. Por exemplo, no modelo acima seria:

$$E[y_t] = \alpha + \beta_t \quad (3)$$

$$VAR[y_t] = \sigma^2 \quad (4)$$

Uma série temporal $\{y_t\}$ é dita covariância-estacionária se a esperança, variância e autocovariância são as mesmas a cada instante t , ou seja:

- $E[y_t]$ é uma constante finita;
- $VAR[y_t]$ é uma constante finita;
- $cov(y_t, y_{t-s})$ depende apenas do lag s .

Essa é uma forma fraca de estacionariedade, que é usualmente o que se quer dizer quando uma série temporal é dita ‘estacionária’. Uma forma mais forte de estacionariedade, em que não só as autocovariâncias como toda a distribuição conjunta é independente da data em que é medida, mas apenas do *lag* s , é dita ‘estritamente estacionária’.

A propriedade de reversão à média de séries estacionárias é bem conhecida. Basicamente, um processo estacionário não pode se distanciar demais de sua média, por ter variância finita. A velocidade de reversão à média é determinada pela autocovariância, ou seja, ela é rápida quando as autocovariâncias são pequenas, e lenta quando são grandes. Para um modelo $AR(1)$ como o que definido acima, a velocidade de reversão à média depende do parâmetro α .

Se tiver $\alpha = 0$, então $\{y_t\}$ é um ruído branco e a reversão é instantânea, pois: $cov(y_t, y_{t-s}) = 0$. À medida que α aumenta em valor absoluto, a velocidade de reversão cai. No limite, quando $\alpha = 1$, $\{y_t\}$ é um passeio aleatório (sem tendência), um tipo de processo não-estacionário, e não há qualquer reversão à média.

Uma série temporal é integrada de ordem n , se sua componente estocástica for não-estacionária, mas se tornar estacionária após ser diferenciada no mínimo n vezes. Assim, um processo que já é estacionário é denotado $I(0)$. Um passeio aleatório é um exemplo de um processo integrado de ordem 1. De modo geral, boa parte dos processos de preços (P) nos

mercados financeiros pode ser caracterizada pelo modelo:

$$\ln P = c + \ln P_{t-1} + \varepsilon_t, t = 1, 2, \dots, \quad (5)$$

com $\varepsilon_t \sim I(0)$.

Atualmente, na literatura sobre econometria, existem diversos testes que verificam a presença de raiz unitária em uma série temporal. Estes testes foram inicialmente propostos por Fuller (1976) e Dickey e Fuller (1979). Mais tarde, foram publicados outros trabalhos sobre este assunto nos artigos de Said e Dickey (1984) e Phillips e Perron (1988). Aqui se utiliza nesse trabalho o teste ADF proposto por Dickey e Fuller (1981) e que se constitui em um dos mais populares e utilizados na prática.

2.4.4 Modelo de correção de erros (MCE)

O modelo de correção de erros (MCE) possui um mecanismo de autorregulação, de maneira que os desvios em relação ao equilíbrio de longo prazo são corrigidos. O MCE é um modelo dinâmico nas primeiras diferenças das variáveis $I(1)$ que foram usadas na equação de cointegração. O nome ‘correção de erros’ vem do fato de o modelo ser construído de modo que desvios de curto prazo em relação ao equilíbrio de longo prazo sejam corrigidos.

A partir de duas séries cointegradas é possível estimar a regressão de equilíbrio de longo prazo utilizando Mínimos Quadrados Ordinários (MQO):

$$y_t = \beta_0 + \beta_1 x_{t1} + \dots + \beta_k x_{tk} + u_{1t}, t=1,2, \dots \quad (6)$$

A partir daí obtêm-se os resíduos defasados e se reespecifica o modelo para a primeira diferença, sendo possível obter o modelo abaixo, que estima a relação de curto prazo entre e as séries utilizadas.

$$\Delta y_t = \alpha (y_{t-1} - \beta x_{t-1}) + \varepsilon_t \quad (7)$$

O α representa o coeficiente do termo de correção de erro e possui informações importantes sobre a dinâmica de correção dos erros do modelo. Na metodologia Engle-Granger, o sinal do coeficiente α deve ser sempre negativo e estatisticamente significativo. Isso indica que o modelo está fora do equilíbrio de curto prazo, ou seja, y_t está fora da sua trajetória de

longo prazo.

O coeficiente α representa o quanto da discrepância existente entre y_t e os regressores do modelo no momento anterior e são eliminadas no momento atual. Quanto mais alto for o coeficiente do MCE, mais rápido é esse ajuste de curto prazo, em relação ao longo prazo.

Caldeira e Moura (2013) definem α como a taxa de correção de erro e afirma que ele indica a velocidade à qual se ajustam para manter o equilíbrio, que é o período ótimo para se manter aberta uma estratégia baseada em reversão à média, também conhecida, como *half-life*, meia-vida. Dessa forma, o *half-life* está relacionado a força de reversão a média, sendo um importante indicador do par selecionado. A fórmula da meia-vida é:

$$\text{meia-vida} = \ln(0,5) / \ln(1+\alpha) \quad (8)$$

Diversos estudos na literatura utilizam a fórmula de Ornstein-Unhlembeck para modelar o tempo de reversão a média de uma série temporal, que utiliza um processo parecido do que foi apresentado acima.

A partir dos preços de dois ativos x e y cointegrados, o MCE fará parte das correlações dinâmicas e a causalidade entre os retornos de ambos. Quando um *spread* entre duas séries temporais reverte à média de longo prazo, existe uma relação de causalidade entre os preços.

Alguns dos estudos sobre os MCEs na literatura são: Alexander (2001), Burgess (2000) e Zivot e Wang (2003), que avaliam pares de séries temporais e as suas relações de correção de longo prazo. Por fim, Brito (2014) realizou um estudo comparativo entre pares ranqueados a partir dos menores valores de meia-vida e os pares selecionados pelo índice Sharpe e concluiu que os ranqueamento pela força de reversão à média (α) apresentou resultados mais lucrativos. Sendo assim, este trabalho seguirá a metodologia de ranquear os pares a partir dos menores valores de meia-vida.

3 METODOLOGIA

Esta pesquisa se classifica fundamentalmente como um estudo de natureza quantitativa, utilizando métodos de análise estatística e econométrica. A pesquisa se qualifica por situar-se no encontro entre o avanço da área de finanças quantitativas e a necessidade de lidar com as incertezas de preços absolutos dos ativos do agronegócio, particularmente no mercado cafeeiro, caracterizado por ampla volatilidade.

Para tanto, a pergunta que direciona este trabalho é: entre os diversos pares de séries temporais de preços dos cafés arábica e robusta negociados nos mercados à vista e futuro na principais bolsas de valores mundiais, é possível identificar pares cointegrados que apresentem uma relação de equilíbrio de longo prazo e uma força de reversão à média estatisticamente significativa, permitindo a implementação de uma estratégia lucrativa de arbitragem estatística, *pairs trading*?

Esta pergunta se faz na hipótese principal que possa existir cointegração, relação de equilíbrio de longo prazo, entre pares de ativos de café arábica e robusta, e o Modelo de Correção de Erros (MCE). Aqui se faz o detalhamento do caminho metodológico percorrido para alcançar os objetivos da pesquisa de identificar pares de ativos de café que possuem relação de equilíbrio de longo prazo e, subsequentemente, ranquear os melhores pares para negociação utilizando a estratégia de arbitragem estatística conhecida como *pairs trading*. O estudo utiliza 8 séries temporais de dados de fechamento diário dos preços dos cafés arábica e robusta, negociados à vista no Brasil e nos mercados futuros da bolsa de São Paulo (B3), ICE de Nova Iorque e de Londres, baseando-se no período de 2019 até junho de 2025. A etapa crucial da metodologia é a identificação dos pares cointegrados por meio da aplicação da metodologia de Engle-Granger. Para os pares validados, a força de reversão à média é analisada pela construção de um Modelo de Correção de Erros (MCE) cujo coeficiente permite calcular a meia-vida, *half-life*. Este indicador é fundamental, pois o menor tempo de meia-vida sinaliza a maior força de reversão à média, sendo o parâmetro utilizado para ranquear a viabilidade dos pares na estratégia de arbitragem.

Inúmeros projetos de arbitragem estatística procuram identificar cestas de ações, que sejam mais rentáveis, que um índice de referência. Diferentemente, esta pesquisa possui limitações expressivas para montagem de cestas de ativos, que permita a diversificação da estratégia e consequentemente redução dos riscos de negociação. Sendo importante destacar, que durante o estudo foram identificadas algumas limitações e abaixo estão relacionadas as três principais:

- i) o mercado à vista possui regras, despesas contábeis, custos de armazenamento e principalmente alocação de capital diferente do mercado futuro;
- ii) as negociações com o mercado futuro exigem a chamada ‘margem de garantia’, que consiste em um valor financeiro alocado, que permita realizar as negociações no mercado futuro. Porém, para pequenos negociadores as bolsas de Nova Iorque (NY), Londres e B3 exigem margens diferentes e contas de investimentos diferentes.
- iii) A dimensão dos contratos de negociação é diferente em cada bolsa. B3 (6.000 kg por contrato), NY (17.010 kg por contrato) e Londres (10.000 kg).

Dessa forma, o foco aqui é identificar quais os pares são cointegrados utilizando a metodologia de Engle-Granger e na sequência a partir do Modelo de Correção de Erros (MCE) identificar qual o par possui menor meia-vida, isto é, menor tempo de reversão à média de longo prazo.

3.1 FONTE DE DADOS

Nesta pesquisa foram utilizados dados diários, considerando cinco dias na semana, de 02 de janeiro de 2019 a 04 de junho de 2025, extraídos no site do Conselho de Exportadores de Café do Brasil (CECAFÉ) e no site do Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA). Os dados foram extraídos em 06 de junho de 2025 e correspondem a 1.559 dias de negociação.

Foram utilizados os valores de fechamento diários dos ativos financeiros derivados dos cafés robusta e arábica. Por se tratar de negociação entre pares, foi removida da base os dias em que não havia dados disponíveis para todos os ativos, conforme a perspectiva de Verbeek (2021). A negociação em pares exige que a negociação ocorra em uma ponta comprada e outra ponta vendida, isto é, os ativos devem estar disponíveis ao mesmo tempo. Portanto, foram removidas 94 observações da amostra original que não atendiam essa prerrogativa.

Foram analisadas 8 séries temporais dos ativos do café, sendo 6 relacionadas aos contratos futuros e as outras 2 aos contratos negociados à vista. Nesse caso, as séries dos contratos futuros partiram do princípio da rolagem de contratos, isto é, no mês do vencimento do contrato, ao invés de caminhar para a liquidação física, os contratos foram rolados para o próximo contrato ativo. O Quadro 1 detalha as informações sobre os ativos e as séries temporais utilizadas neste estudo.

Quadro 1: Relação de ativos a serem analisados

Código	Ativo	Unidade	Informações adicionais	Fonte
AR BR	Preço café arábica à vista no Brasil	US\$ / saca 60 kg	Entregue em SP	CEPEA
RO BR	Preço café robusta à vista Brasil	US\$ / saca 60 kg	Retirar na origem no ES	CEPEA
AR B3-1	Preço café arábica no mercado futuro da B3, próximo vencimento	US\$ / saca 60 kg	Entregue em SP	CECAFÉ
AR B3-2	Preço café arábica no mercado futuro B3, segundo vencimento	US\$ / saca 60 kg	Entregue em SP	CECAFÉ
AR NY-1	Preço café arábica no mercado futuro ICE — NY, primeiro vencimento	Cents (US\$) / libra	Entregue nos USA, Alemanha, Bélgica e Espanha	CECAFÉ
AR NY-2	Preço café arábica no mercado futuro ICE — NY, segundo vencimento	Cents (US\$) / libra		CECAFÉ
RO LON-1	Preço café robusta no mercado futuro ICE — Londres, primeiro vencimento	US\$ / ton. métrica	Entregue em Londres ou USA	CECAFÉ
RO LON-2	Preço café robusta no mercado futuro ICE — Londres, segundo vencimento	US\$ / ton. métrica		CECAFÉ

Fonte: Autor (2025).

É importante destacar que todas as séries temporais foram convertidas para US\$/saca de 60 kg para facilitar o efeito comparativo. O Quadro 2 também apresenta o vencimento dos principais contratos futuros de café.

Quadro 2: Vencimentos dos contratos futuros do café

Ativo	Séries	Mês de vencimento	Data de vencimento	Rolagem do contrato
Robusta (Londres)	F	Janeiro	Quarto dia útil anterior ao último dia útil do mês de entrega.	Quarto dia útil anterior ao primeiro dia útil do mês da entrega
	H	Março		
	K	Maio		
	N	Julho		
	U	Setembro		
	X	Novembro		
Arábica (SP e NY)	H	Março	Oitavo (B3) ou sétimo (NY) dia útil antes do encerramento do mês de entrega.	Sétimo dia útil anterior ao mês de vencimento
	K	Maio		
	N	Julho		
	U	Setembro		
	Z	Dezembro		

Fonte: Autor (2025).

Para avaliação da rentabilidade das operações envolvendo o mercado futuro é fundamental o entendimento da margem de garantia de cada mercado, que representa o capital imobilizado necessário para negociar no mercado futuro. Seguem abaixo os valores consultados no mês de setembro de 2025, conforme se pode ver na Tabela 1.

Tabela 1: Capital imobilizado para negociação do contrato futuro

Mercado	Margem de garantia depositada para negociação	Margem de garantia (US/saca de 60 kg)
À vista	US\$ 400,00 por saca de 60 kg	US\$ 450,00 / saca
À vista	US\$ 240,00 por saca de 60 kg	US\$ 240,00 / saca
B3	R\$ 24.500,00 por contrato de 6.000 kg	US\$ 43,7 / saca
NY	US\$ 11.500,00 por contrato 37.500 pounds	US\$ 40,9 / saca
Londres	US\$ 6.680,00 por contrato de 10.000 kg	US\$ 40,1 / saca

Fonte: Autor (2025).

Uma avaliação comparativa dos valores de margem de garantia, que permite realizar negociações no mercado internacional do café, contém informações valiosas na construção da estratégia de arbitragem. Isso porque os negociadores do mercado futuro possuem uma vantagem substancial de negociação, que permite alavancar suas posições em quase 10x em relação aos negociadores do mercado à vista. Além disso, os diferentes tamanhos de contrato são uma forte barreira para pequenos negociadores realizarem arbitragem entre as 3 principais bolsas do mundo.

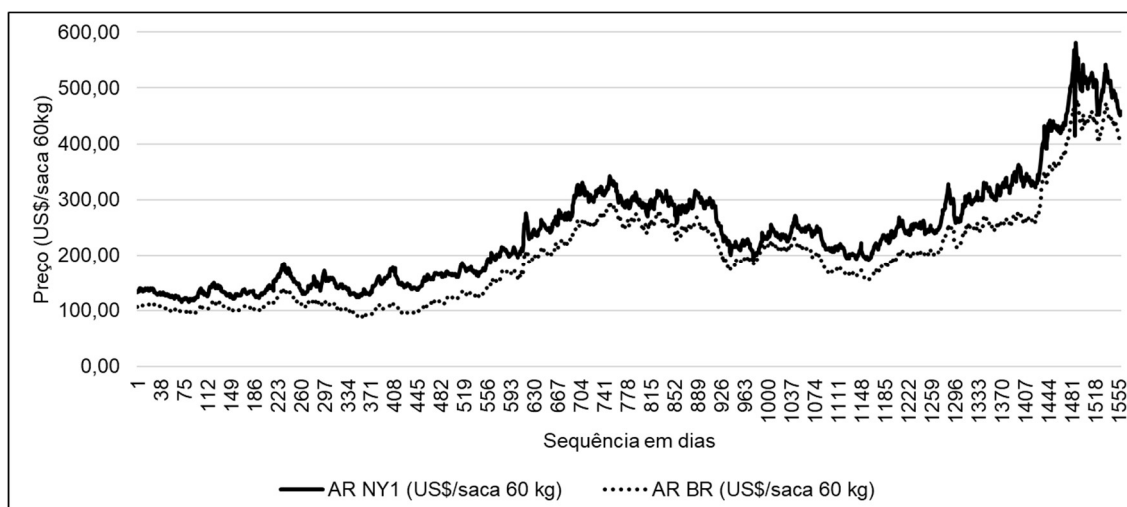
Outro fator relevante são as despesas contratuais no momento da liquidação física, que envolve emissão de nota fiscal, impostos de circulação de mercadoria, imposto de renda sobre os lucros e no caso de exportação de mercadorias também o pagamento de despesas aduaneiras, entre outros. Portanto, para efeito de simplificação não serão avaliadas as despesas de liquidação física e financeira.

Apesar da complexidade de avaliar diferentes mercados, em diferentes continentes, com diferentes tipos de café, o ponto em comum de estudo é o café verde padronizado como *commodity*. Portanto, o mesmo produto possui tributações diferentes por estados e países, além dos desafios logísticos e armazenagem, mas este trabalho se dedicará exclusivamente em entender os movimentos cointegrados dessas *commodities*, se há relação de longo prazo e quais pares seriam mais efetivos para a estratégia de arbitragem. Para isso, o parâmetro que será considerado é a meia-vida, conforme Caldeira e Moura (2013), que é, o tempo médio de reversão à média, que será medido em dias. Ele representa a força de reversão a média, já que, quanto menor for a meia-vida, maior a força de reversão a média.

3.2 ANÁLISE DOS DADOS

Este estudo avalia dois mercados de café distintos, o mercado do robusta (conilon) e o do arábica. No entanto, para efeito de análise são realizadas avaliações de integração entre esses mercados. De acordo com Gatev, Goetzmann e Rouwenhorst (2006) ativos financeiros tendem a formar pares em mercados semelhantes. As 8 séries temporais do estudo são 3 do mercado de café robusta e 5 do mercado de café arábica. Para facilitar as análises foram padronizadas as unidades para US\$, em relação à moeda, e por kg, em relação à unidade de peso. O Gráfico 3 apresenta um exemplo de par de duas séries temporais do mercado do café arábica.

Gráfico 3: Preços do mercado do café arábica à vista no Brasil e futuro em Nova Iorque entre janeiro de 2019 a junho de 2025



Fonte: Autor (2025).

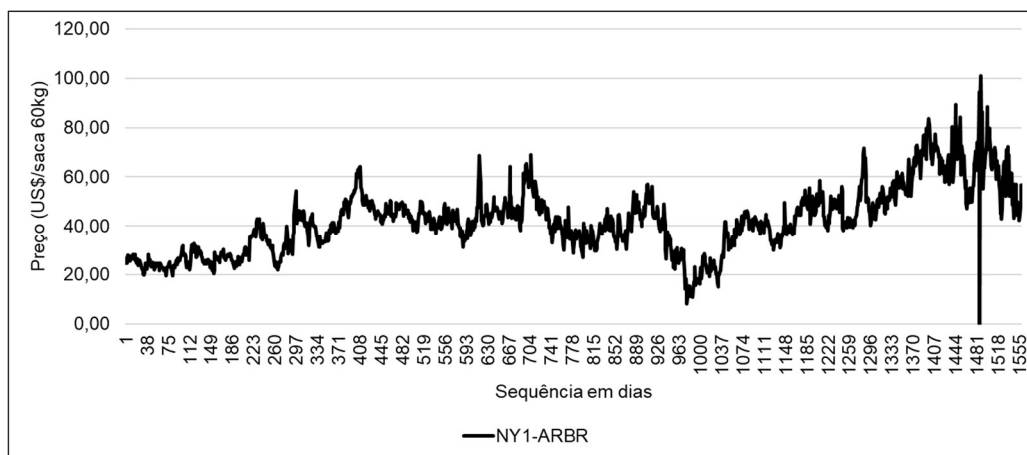
A partir da observação gráfica imediata é possível identificar que as séries possuem movimentos semelhantes. Porém, é necessário o teste de cointegração para assegurar que as séries possuem uma relação de longo prazo. Outro ponto fundamental é que para efeitos de estudos e simplificação foram usados os dados de fechamento diário, sendo necessário enfatizar, que na avaliação intradiária e conforme o mercado em avaliação há uma influência direta da liquidez dos ativos. As reais oportunidades de arbitragem só ocorrem em momentos específicos, portanto há a necessidade de ferramentas adicionais para monitoramento e identificação adequada do momento da arbitragem.

Durante o período analisado, o preço absoluto do café arábica apresentou uma clara tendência de crescimento e alta volatilidade, inicialmente em função da pandemia da COVID-19, que impactou diretamente a economia mundial e consequentemente o mercado mundial das *commodities*. Nesse período o Brasil apresentou uma forte variação cambial, que beneficiou os exportadores brasileiros. Por fim, o período de altas dos preços apresentado nos anos de 2024 e 2025, em função de uma das maiores secas históricas, que atingiram o Brasil e reduziu as expectativas de produtividade da safra seguinte. Mais uma vez é importante destacar, que o preço absoluto do café é sensível a inúmeras variáveis, porém ao avaliar o *spread* de preços aumenta substancialmente a possibilidade de melhores previsibilidades estatísticas.

O Gráfico 4 apresenta a evolução do *spread*, entre janeiro de 2019 a junho de 2025, para as duas séries temporais analisadas no Gráfico 3. Foi realizado o cálculo do desvio padrão das séries temporais do *spread* e dos preços do mercado futuro de NY e os resultados foram respectivamente: US\$ 13,83/saca 60 kg e US\$ 97,01/saca 60 kg. Dessa maneira, percebe-se que

a estratégia de avaliar o preço relativo reduz substancialmente volatilidade comum do mercado de café.

Gráfico 4: Diferença, *spread*, dos preços do mercado do café arábica à vista no Brasil e futuro em Nova Iorque entre janeiro de 2019 a junho de 2025



Fonte: Autor (2025).

A Tabela 2 contém os dados da estatística descritiva das séries temporais completas em análise.

Tabela 2: Estatística descritiva das séries temporais completas (US\$/saca 60 kg)

	AR NY-1	AR NY-2	AR B3-1	AR B3-2	AR BR	RO LON-1	RO LON-2	RO BR
Desvio padrão	97,01	94,28	95,10	91,86	88,56	75,71	72,95	72,60
Média	238,64	238,62	218,52	217,95	196,48	143,95	141,98	138,59
Mínimo	114,62	116,40	99,75	103,31	88,97	65,04	67,26	58,71
Máximo	580,57	562,31	530,26	520,79	480,81	452,58	349,26	363,92

Fonte: Autor (2025).

3.3 TESTE ENGLE-GRANGER

Atualmente há diversos testes que verificam se duas ou mais séries são cointegradas. Com destaque para três testes clássicos. O primeiro é o teste de Engle-Granger, proposto por

Engle e Granger (1987) que constitui um dos testes mais utilizados devido a sua facilidade de aplicação. O segundo teste foi apresentado por Phillips e Ouliaris (1990). O terceiro foi desenvolvido por Johansen e Juselius (1990). Neste trabalho serão considerados os testes de Engle e Granger pelo simples motivo de que todas as análises foram realizadas para pares de ativos, e esse teste é recomendado para estimar cointegração de até duas séries temporais.

O teste de Engle-Granger é um processo com dois passos: primeiro se estima uma regressão linear ordinária nos dados das variáveis $I(1)$, e depois se aplica um teste de estacionariedade nos resíduos dessa regressão. Os valores críticos para esse teste são dados por MacKinnon (1991). Para o caso de somente duas variáveis, x e y , a regressão de Engle-Granger tem a seguinte equação:

$$x_t = \alpha + \beta y_t + \varepsilon_t, t=1,2, \dots \quad (9)$$

Entende-se que x e y serão cointegrados se, e somente se, ε for estacionário. Então se tem um vetor de cointegração dado por $(1, -\beta)$. É importante destacar a necessidade de avaliações amostrais de longo prazo para detecção de tendências comuns.

Uma regressão linear ordinária entre n variáveis $I(1)$ cointegradas vai estimar uma combinação linear dessas séries que é estacionária. Quando $n=2$, não importa qual variável é tomada como dependente. Existe apenas um vetor de cointegração. Porém, quando há mais de duas séries $I(1)$, a metodologia de Engle-Granger pode apresentar viés. Dessa forma, essa metodologia normalmente não é utilizada em avaliações com mais de duas variáveis cointegradas.

3.3.1 Teste de raiz unitária Dickey-Fuller Aumentado (ADF)

O objetivo dos testes de raiz unitária é essencialmente detectar se uma dada série foi suficientemente diferenciada para se tornar estacionária. Para tanto, testa-se a hipótese nula de que a série não é estacionária, ou seja, possui raiz unitária contra a alternativa de que a série é estacionária. O teste de Dickey-Fuller Aumentado (ADF) Dickey e Fuller (1981) consiste num método clássico que utiliza uma extensão dos testes de Dickey-Fuller (1979). A forma mais simples de testar estacionariedade baseia-se em um processo AR(1), que pode ser apresentado de uma maneira simplificada como:

$$y_t = \rho y_{t-1} + \varepsilon_t, t=1,2, \dots \quad (10)$$

onde ε_t é o termo do erro aleatório conhecido como ruído branco, que apresenta média zero, variância σ^2 constante e é não autocorrelacionado. O teste de Dickey-Fuller (1979) consiste em testar:

$$H_0: \rho=1 \text{ versus } H_1: \rho<1. \quad (11)$$

Sob a hipótese nula, y_t não é um processo estacionário, sendo, portanto, um passeio aleatório com mudança de nível. Sob a hipótese alternativa, y_t é um processo estacionário AR(1).

Dickey e Fuller (1981) demonstraram que os valores críticos para um teste baseado na estatística ADF são idênticos àqueles associados à estatística do teste DF.

Após aplicar um teste de Dickey-Fuller, se não tiver argumento para rejeitar a hipótese nula de não-estacionariedade, não se pode concluir imediatamente que o processo é I(1). Isso porque ele pode ser I(2) ou até integrado de uma ordem superior. Assim, deve-se mudar hipótese nula para $H_0 : y_t \sim I(2)$ e testá-la contra $H_1 : y_t \sim I(1)$ seguindo o mesmo procedimento anterior, apenas tirando mais uma diferença.

A evolução do teste DF deu origem ao teste de Dickey-Fuller aumentado (ADF). A diferença é que nesse teste se adicionam lags das variáveis dependentes à regressão DF. O número de lags incluído deve ser o suficiente para remover a autocorrelação entre os erros, de maneira que uma regressão por mínimos quadrados ordinários (MQO) resulta em uma estimativa não-viesada do coeficiente de y_{t-1} .

3.3.2 Identificação dos pares

Normalmente as séries de preços no mercado financeiro não são estacionárias. Porém, existem pares que o *spread*, isto é a diferença de preços das séries é estacionário. Essas duas séries são ditas cointegradas e potenciais ao *pair trading*.

Após os tratamentos iniciais na base de dados será desenvolvido o modelo para arbitragem estatística, aplicando as técnicas de cointegração. O teste de Engle-Granger possui etapas claras nessa identificação. Portanto, o Quadro 3 abaixo apresenta informações sobre esses testes, que foram realizados ao nível de significância de 5%.

Quadro 3 – Testes realizados

Teste	Objetivo do teste	Decisão
Teste da raiz unitária _ Dickey Fuller Aumentado H_0 : a ST tem raiz unitária (não estacionária)	Verificar se a série pode ser um passeio aleatório, ou seja, se tem uma tendência estocástica, devido à presença de raiz unitária.	Se p-valor for menor que o nível de significância, então rejeita-se H_0 , ou seja, a ST é estacionária em relação à tendência estocástica
Teste sobre os coeficientes estimados no modelo. H_0 : os coeficientes são iguais a zero	Avaliar a significância dos coeficientes estimados	Se p-valor for menor que o nível de significância, então rejeita-se H_0 , ou seja, os coeficientes são diferentes de zero.
Teste correlação dos resíduos H_0 : os resíduos são ruídos brancos	Avaliar se os resíduos do modelo estimado é um ruído branco	Se p-valor for menor que o nível de significância, então rejeita-se H_0 , ou seja, os resíduos não são ruídos brancos.

Fonte: Autor (2025).

Os pares validados no teste Engle-Granger, são ditos pares cointegrados e, portanto, possuem correlação de longo prazo e o *spread* possui propriedade de reversão a média. Foram analisadas as possibilidades de cointegração de 28 pares.

3.4 MODELO DE CORREÇÃO DE ERROS (MCE)

Séries de tempo cointegradas podem ser representadas por meio de um vetor de correção de erros (VECM– Teorema da Representação de Granger), no qual a dinâmica das séries de tempo é modelada como função de seus valores defasados, dos valores defasados de seu par cointegrado e de um componente de correção de erro, o qual corrige os desvios da relação de equilíbrio nos períodos anteriores.

Nesta pesquisa, o MCE é empregado para calcular a meia-vida dos pares utilizados na estratégia *pairs trading*, que é utilizada para definir o período em que a operação deve ser mantida em aberto.

A ideia por trás da correção de erros é que sistemas cointegrados têm um equilíbrio de longo-prazo, isto é, a média de longo prazo da combinação linear das duas séries. Se ocorre um desvio em relação ao equilíbrio de longo prazo, uma ou as duas séries ajustam para restaurar o equilíbrio. Dessa forma se fará a identificação da taxa de correção de erro (α), indicando a velocidade à qual as séries se ajustam para manter o equilíbrio, usado para determinar o período ótimo para se manter aberta uma estratégia baseada em reversão à média.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Foram analisadas 8 séries temporais, que geraram a possibilidade de 28 pares de negociação, dos quais 11 apresentaram cointegração no teste Engle-Granger. Foi avaliada estacionariedade de cada série temporal para avaliar se todas possuem o mesmo nível de diferenciação. A Tabela 3 demonstra o resultado do teste de raiz unitária utilizando o Dickey-Fuller Aumentado (ADF).

Tabela 3 - Teste de estacionariedade (ADF) para as séries completas (janeiro de 2019 a junho de 2025)

Série Temporal	P — valor
AR NY-1	0,9347
AR NY-2	0,9577
AR B3-1	0,9511
AR B3-2	0,9407
AR BR	0,971
RO LON-1	0,9185
RO LON-2	0,9032
RO BR	0,8175

Fonte: Autor (2025).

Conforme Tabela 3, todas as séries temporais apresentam raiz unitária, ou seja, rejeitam a hipótese de H_0 ao nível de significância de 5%. Além disso, todas as séries temporais se tornaram estacionárias na primeira diferenciação. Portanto, todas as séries foram possíveis para construção dos pares de negociação. A partir daí foram realizados os testes de cointegração de Engle-Granger para definição de quais pares de negociação são cointegrados e assim, admissíveis para arbitragem estatística. Seguiu-se as duas etapas do teste de Engle-Granger e a Tabela 4 apresenta os testes dos pares que resultaram em um resíduo, que é ruído branco, isto é, pares que são cointegrados e possuem equilíbrio de longo prazo. Portanto, seguem-se as avaliações com 8 pares de café arábica e 3 pares para café robusta (conilon).

Tabela 4 – Testes dos resíduos dos pares integrados

PARES COINTEGRADOS		EG (p-valor)
AR BR	AR B3-1	0,0000
AR BR	AR B3-2	0,0014
RO BR	RO LON-1	0,0168
RO BR	RO LON-2	0,0482
AR B3-1	AR B3-2	0,0000
AR B3-1	AR NY-1	0,0000
AR B3-1	AR NY-2	0,0004
AR B3-2	AR NY-1	0,0010
AR B3-2	AR NY-2	0,0170
AR NY-1	AR NY-2	0,0000
RO LON-1	RO LON-2	0,0000

Fonte: Autor (2025).

O Quadro 4 apresenta os pares reprovados no teste de cointegração Engle-Granger e, portanto, não possuem relação de equilíbrio de longo prazo, isto é, apresentaram regressões espúrias.

Quadro 4 – Pares que não apresentaram cointegração

AR B3-1	RO LON-1	AR NY-1	RO LON-1
AR B3-1	RO LON-2	AR NY-1	RO LON-2
AR B3-2	RO LON-1	AR NY-2	RO LON-1
AR B3-2	RO LON-2	AR NY-2	RO LON-2
AR BR	AR NY-1	RO BR	AR B3-1
AR BR	AR NY-2	RO BR	AR B3-2
AR BR	RO BR	RO BR	AR NY-1
AR BR	RO LON-1	RO BR	AR NY-2
AR BR	RO LON-2		

Fonte: Autor (2025).

Os testes confirmaram o que foi dito por Gatev, Goetzmann e Rouwenhorst (2006), que setores diferentes tendem a não apresentar cointegração, ou seja, os ativos que derivam dos cafés arábica e robusta não são cointegrados e, portanto, não possuem equilíbrio de longo prazo. Para explicar isso, três fatores podem ser destacados:

- 1) O café arábica tem o Brasil como líder mundial de produção, já o café robusta possui o Vietnã como líder mundial de produção, o que naturalmente incorre em ciclos de safra e entressafra diferentes;
- 2) Essas duas espécies de café são negociadas em mercados financeiros distintos. Além da B3, o arábica é negociado em Nova Iorque e o robusta em Londres. Portanto, sujeitos a tarifas e políticas comerciais de cada países diferentes.
- 3) Por fim, como já destacado neste trabalho, o café robusta é utilizado como *blend*, isto é, ele complementa o café arábica em uma mistura. Conforme estudos de Schnaider e Saes (2013) o percentual de café robusta nesse *blend* é diretamente afetado pelos preços do café arábica. De uma maneira resumida, se o preço do café arábica aumenta, os torrefadores aumentam a quantidade de café robusta na composição final, procurando a maximização do lucro.

Um ponto importante diante das possibilidades de arbitragem envolvendo mercado à vista e futuro é a identificação dos melhores pares de negociação. Neste trabalho foi modelado o Mecanismo de Correção de Erros (MCE) para cada par cointegrado, a partir do qual se obteve o α , que representa a velocidade de ajuste de uma variável em função do equilíbrio de longo prazo. Além disso, a partir do α é possível calcular um indicador conhecido como *half-life*, ou meia-vida, que indica quanto tempo em média o *spread* levará para retornar a metade do seu desvio após um choque. Dessa forma, o *half-life* está relacionado a força de reversão a média, sendo um importante indicador do par selecionado.

Conforme Caldeira e Moura (2013) foi calculada a meia-vida de cada par cointegrado e a Tabela 5 apresenta os resultados encontrados.

Tabela 5 – Resultado da força de reversão a média dos pares cointegrados

PARES COINTEGRADOS		meia-vida (dias úteis)
AR NY-1	AR NY-2	1,3
RO LON-1	RO LON-2	2,9
AR B3-1	AR B3-2	4,9
AR B3-2	AR NY-2	6,6
AR B3-1	AR NY-2	8,6
AR B3-1	AR NY-1	13,4
AR B3-2	AR NY-1	13,6
AR BR	AR B3-1	20,0
AR BR	AR B3-2	20,3

Fonte: Autor (2025).

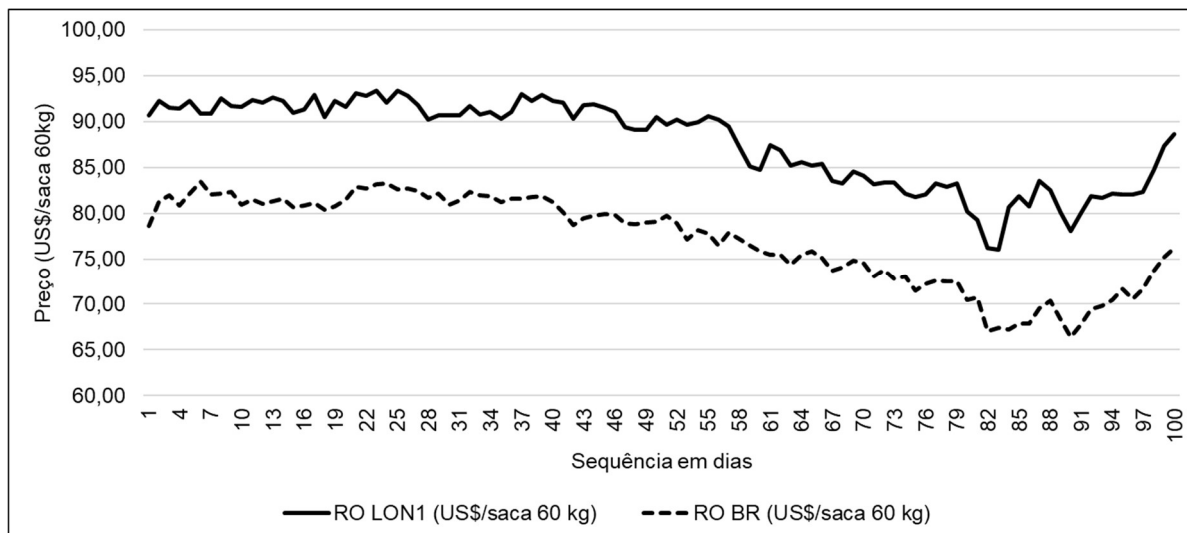
É importante destacar alguns pontos sobre a análise dos pares com menor meia-vida, sendo ótimas opções de negociações com arbitragem estatísticas. Os três primeiros pares apresentam mais facilidade de negociações, já que pertencem aos mesmos países, estão inseridos na mesma bolsa de valores e podem ser negociados a partir do mesmo depósito de margens. Dessa forma, são ótimas escolhas para aplicação da estratégia.

Houve dois pares, envolvendo a negociação de café robusta à vista no Brasil e futuro em Londres, apesar de serem cointegrados, durante a avaliação do MCE, os valores de α não apresentaram resultados significantes estatisticamente ao nível de 5% de significância. Diante disso, esses dois pares não foram recomendados para a estratégia.

As estratégias envolvendo mercado físico e futuro possuem pontos de atenção relevantes para pequenos investidores, já que, são mercados que envolvem tributações e despesas operacionais totalmente independentes. Apesar de apresentarem opções lucrativas de arbitragem, elas envolvem estratégias que ultrapassam o *pair trading*.

O Gráfico 5 ilustra o comportamento do par formado pelo contrato futuro Londres 1 e o preço à vista no Brasil, que formam um dos pares analisados e são cointegrados.

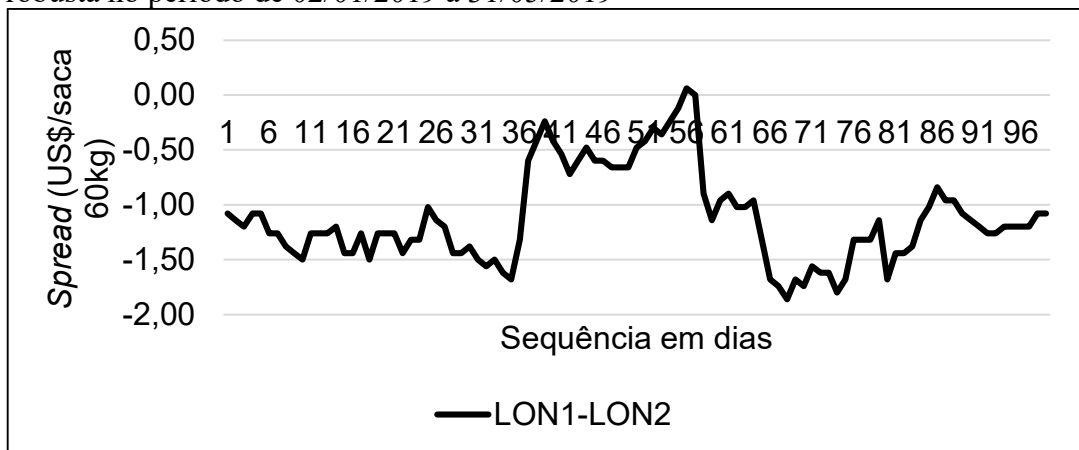
Gráfico 5 – Série de preços do café robusta no contrato futuro em Londres 1 e à vista no Brasil no período de 02/01/2019 à 31/05/2019



Fonte: Autor (2025).

No Gráfico 6 é apresentada a série do *spread*, que representa a diferença entre os preços de outras duas séries temporais, sendo o primeiro e segundo vencimentos do mercado futuro do café robusta em Londres no período de 02/01/2019 a 31/05/2019.

Gráfico 6: Diferença de preços (*spread*) do par contrato futuro em Londres 1 e Londres 2 do café robusta no período de 02/01/2019 à 31/05/2019

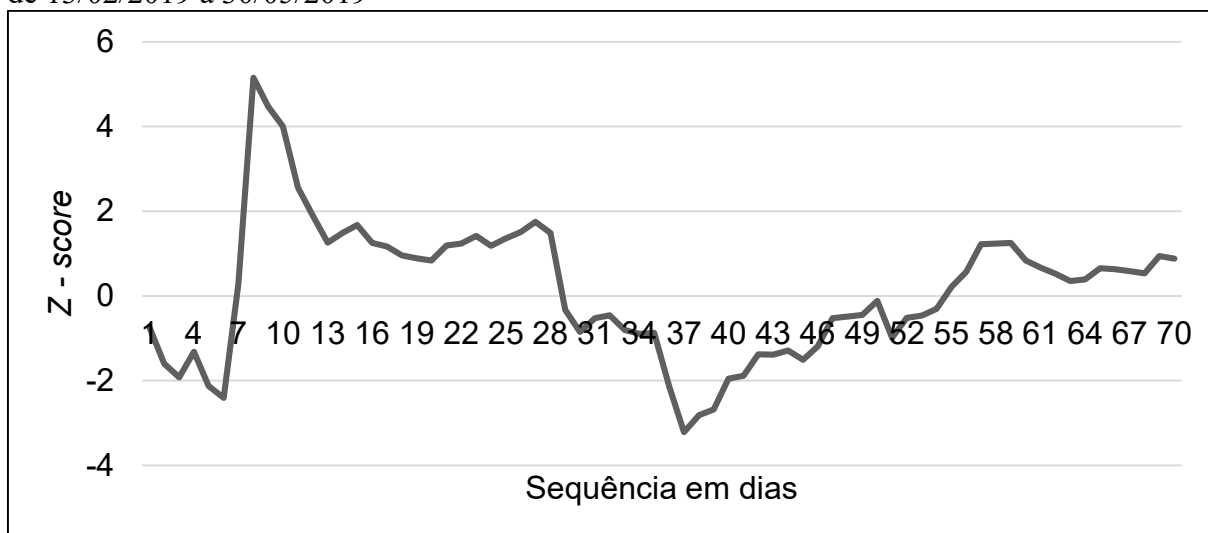


Fonte: Autor (2025).

Por fim, segue o Gráfico 7 no qual se apresenta o *spread* padronizado ou também conhecido como *z-score*, tendo como base a média das últimas 30 negociações e normalizada pelo desvio padrão. Conforme Gatev, Goetzmann e Rouwenhorst (2006), Caldeira e Moura (2013) e muitos outros, o *z-score* facilita a identificação dos pontos de entrada e saída das

negociações a partir da quantidade de desvios padrão divergente e mostra a capacidade de reversão da média de longo prazo.

Gráfico 7: Z-score do par contrato futuro em Londres 1 e Londres 2 do café robusta no período de 13/02/2019 a 30/05/2019



Fonte: Autor (2025).

Estratégias desta natureza resultam operações altamente alavancadas. Mesmo cada posição sendo relativamente pequena em relação ao mercado na sua totalidade, o efeito agregado das várias posições podem potencializar as perdas. Portanto, essa estratégia deve envolver a diversificação de ativos e posições, além de utilização de mecanismo de redução de perdas, tal como *stop-loss*. Apesar, deste estudo ser direcionado para o mercado mundial de café, o ideal é a montagem de uma carteira com diversos ativos de *pair trading*, conforme os estudos, que fundamentaram este trabalho. Principalmente, devido ao risco de quebra estrutural de determinado ativo ou mercado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa foi proposta a implementação de uma estratégia de arbitragem estatística conhecida como *pairs trading* aplicada ao mercado mundial de café arábica e robusta. A estratégia foi desenvolvida utilizando a cointegração e a velocidade de reversão à média dos pares cointegrados. Assim, o primeiro objetivo é se propor a desenvolver um método para identificar pares que possam ser usados na estratégia *pairs trading*. Após a identificação dos pares se conduz uma análise dos co-movimentos entre as séries, buscando identificar a força de reversão à média através da estimação da meia-vida, a qual é relevante para aplicação da estratégia.

A partir das séries de preços dos cafés arábica e robusta primeiramente se realiza testes de cointegração de Engle-Granger em todas as combinações de pares possíveis visando identificar pares de ações que compartilham uma relação de equilíbrio de longo prazo. Posteriormente, para os pares que passam nos testes de cointegração, é calculada a meia-vida, a partir do modelo de correção de erros. Por fim, calcula-se o *spread* padronizado entre os pares selecionados. Exclusivamente para este trabalho não foi estruturada uma carteira de ativos para arbitragem no café, mas focou-se em avaliar os melhores pares para aplicação da técnica.

Os testes confirmaram o que foi dito por Gatev, Goetzmann e Rouwenhorst (2006), que setores diferentes tendem a não apresentar cointegração, ou seja, os ativos que derivam dos cafés arábica e robusta não são cointegrados. A partir de uma pequena análise das divergências de safra e entressafra de ambos os cafés robusta e conilon, complementares na produção de vários tipos de cafés no mundo, entende-se que não possuem equilíbrio de preços no longo prazo. Portanto, segue-se com negociações diferenciadas para cada tipo de café, sendo 8 pares de café arábica e 3 pares para café robusta (conilon). Os três pares que mostraram maior viabilidade para negociações foram: AR NY-1_AR NY-2, RO LON-1_RO LON-2 e AR B3-1_AR B3-2.

Os pares RO BR_RO LON-1 e RO BR_RO LON-2, apesar de serem cointegrados, os valores de α não apresentaram resultados significantes estatisticamente ao nível de 5% de significância. Diante disso, esses dois pares não foram recomendados para a estratégia.

As estratégias envolvendo mercado físico e futuro possuem pontos de atenção relevantes para pequenos investidores, já que, são mercados que envolvem tributações e despesas operacionais totalmente independentes. Apesar de apresentarem opções lucrativas de arbitragem, elas envolvem estratégias que vão além do *pair trading*, tais como: armazenagem, logística e comércio exterior. Negociadores do mercado futuro possuem uma vantagem de

negociação substancial, que permite alavancar suas posições em quase 10x em relação aos negociadores do mercado à vista. Além disso, os diferentes tamanhos de contrato são uma forte barreira para pequenos negociadores realizarem arbitragem entre as 3 principais bolsas do mundo.

Ainda, a constatação de que mesmo integrado, o mercado de café robusta possui importante distanciamento entre o Brasil e Londres. Conforme a tese apresentada por Nogueira (2005) há uma relação de alta dependência entre o Vietnã, que é o maior produtor mundial de robusta.

Por fim, em contraste com o apresentado por Hogan *et al.* (2004) sobre quatro propriedades da estratégia de arbitragem estatística, foi possível identificar neste trabalho, que diferença da aplicação dessa técnica no mercado à vista de ações ao aplicá-la em *commodities* do mercado futuro: não é autofinanciada, ao haver a necessidade de margem de garantia para negociações no mercado futuro e no mercado à vista a compra do ativo;

Além disso, há riscos importantes envolvendo as negociações do ativo físico e o mercado futuro, que não convergem para zero. É possível citar: os custos variáveis de tarifas entre países, a diferença de liquidez entre a venda à vista e futura e por fim a logística de entrega. Dessa forma, este trabalho detalhou que a técnica de *pair trading* é facilitada quando aplicada entre ativos do mercado futuro do mesmo país, obviamente não rejeita as oportunidades envolvendo os demais pares de negociação, que foram claramente analisadas.

Com relação a trabalhos futuros é possível ampliar as análises para demais *commodities* negociadas no mercado futuro e elaboração de uma cesta de pares de *commodities* para a devida simulação de rentabilidade, com atenção especial às despesas operacionais de cada par. Além disso, cabem análises que extrapolem o primeiro e segundo vencimento das séries temporais. Outra avaliação complementar seriam as integrações de curto prazo, que também possam apresentar oportunidades com baixo risco, a partir de mecanismo de prevenção de perdas.

Portanto, o presente trabalho cumpriu integralmente seu objetivo principal de identificar pares de séries temporais de ativos de café com relação de equilíbrio de longo prazo e, conseqüentemente, respondeu à questão de pesquisa, entre os diversos pares de séries temporais de preços dos cafés arábica e robusta negociados nos mercados à vista e futuro na principais bolsas de valores mundiais, se é possível identificar pares cointegrados que apresentem uma relação de equilíbrio de longo prazo e uma força de reversão à média estatisticamente significativa, permitindo a implementação de uma estratégia lucrativa de arbitragem estatística, *pairs trading*. Foi possível identificar pares cointegrados que apresentam uma relação de equilíbrio de longo prazo e uma força de reversão à média estatisticamente

significativa, permitindo a proposta de implementação de uma estratégia de arbitragem estatística *pairs trading*. A metodologia quantitativa adotada, que focou na análise de preços relativos, *spread*, ameniza a volatilidade comum do mercado de café e utilizou a identificação de cointegração via Engle-Granger, seguida pela construção do Modelo de Correção de Erros (MCE) para estimar a meia-vida, *half-life*, indicador crucial para ranquear a viabilidade dos pares. Dos 28 pares analisados, 11 foram validados como cointegrados, sendo 8 pares de café arábica e 3 pares robusta; os testes também confirmaram a tendência de que ativos de setores diferentes não apresentam cointegração. Os três pares ranqueados com maior viabilidade para negociações, por possuírem a menor meia-vida, foram: AR NY-1_AR NY-2, RO LON-1_RO LON-2 e AR B3-1_AR B3-2. Contudo, a aplicação da técnica em *commodities* futuras e físicas revelou que as negociações não aderem estritamente às quatro propriedades de arbitragem estatística de Hogan *et al.* (2004), devido à necessidade de margem de garantia e à persistência de riscos operacionais (como tarifas, logística e diferença de liquidez) que não convergem a zero, sugerindo que a máxima eficácia da estratégia se dá entre ativos do mercado futuro da mesma bolsa.

REFERÊNCIAS

- ALEXANDER, C. **Market Models: A Guide to Financial Data Analysis**, Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons: 2001.
- BAPTISTA, D. M. **Integração e assimetrias na transmissão de preços de café arábica no Brasil**. São Paulo: ESALQ / USP, 2015.
- BARRETO, R. C. S.; ZUGAIB, A. C. C. **Dinâmica do mercado internacional de café e determinantes na formação de preços**. Paraná: Economia & Região, 2016.
- BERHANE, T.; ADAM, M.; AWGICHEW, G.; HAILE, E. **Modeling Coffee Price using Jump Diffusion Model: The case of Ethiopia**. Indonésia: International Journal of Computing Science and Applied Mathematics, 2019.
- BERTRAM, W. K. **Analytic solutions for optimal statistical arbitrage trading**. Holanda: Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2010.
- BOX, George P.; JENKINS, Gwilym M. **Time series analysis, forecasting and control**. San Francisco: Ed. HoldenDay, 1976.
- BRITO, I. A. **Uma nova estratégia de negociação em pares**. São Paulo: FGV/EESP, 2014.
- BURGESS, A.N. **A Computational Methodology for Modelling the Dynamics of Statistical Arbitrage**. Londres: Department of Decision Sciences, London Business School, 2000.
- CALDEIRA, J.F. **Arbitragem Estatística, Estratégia Long-Short Pairs Trading, Abordagem com Cointegração Aplicada ao Mercado de Ações Brasileiro**. Brasília: Revista Economia, 2013
- CALDEIRA, J. F.; MOURA, G. V. **Selection of a portfolio of pairs based on cointegration: A statistical arbitrage strategy**. Rio de Janeiro: Brazilian Review of Finance. 2013
- CEPEA/ESALQ. Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. Disponível em: www.cepea.esalq.usp.br. Acesso em: jun.2025
- CHEN, Zhiwu; KNEZ, Peter J. **Measurement of Market Integration and Arbitrage**. Carolina do Norte: Review of financial studies, jun. 1995
- COELHO, L. *et al.* **Podemos prever a taxa de câmbio brasileira?** Evidências empírica utilizando inteligência computacional e modelos econométricos. São Carlos: Revista Gestão de Produção, 2008.
- CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento). **Safra de café encerra em 54,2 milhões de sacas em 2024 impactada por clima adverso**. Disponível em: www.conab.gov.br/ultimas-noticias/5900-safra-de-cafe-encerra-em-54-2-milhoes-de-sacas-em-2024-impactada-por-clima-adverso. Acesso em: 03 de abril de 2025.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL – CNA. **Safra 2017/2018 bate recorde de produção e compromete receita bruta dos produtores**.

Disponível em https://www.cnabrazil.org.br/boletins/safra-2017-2018_bate-recorde-de-producao-e-compromete-receita-bruta-dos-produtores. Acesso em: out. de 2025.

CONSELHO DOS EXPORTADORES DE CAFÉ DO BRASIL. Cecafé. São Paulo, [entre 1999 e 2024]. Disponível em: <https://www.cecafe.com.br/>. Acesso em: out. de 2025.

COPELAND, T. E.; WESTON, J. F.; SHASTRI, K. **Financial theory and corporate policy** Massachusetts: Addison-Wesley, 1998.

CORSINI, F. P.; RIBEIRO, C. D. O. **Dinâmica e previsão de preços de commodities agrícolas com o filtro de Kalman**. Rio de Janeiro: Anais: XIX ENEGEP-Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2008.

CUMMINS, M.; BUCCA, A. (2012). **Quantitative spread trading on crude oil and reneid products markets**. Oxfordshire: Quantitative Finance, 2012

CUNHA, D. A.; BRAGA, M. J.; CAMPOS, A. C.; FERNANDES, L. L. **Transmissão de preços no mercado internacional de café robusta**. Minas Gerais: Revista de Economia e Agronegócio, 2008.

D.E. SHAW & CO. Investment approach. Disponível em: <https://www.deshaw.com/what-we-do/investment-approach>. Acesso em: set. 2025.

DIAS, L. D. O.; SILVA, M. D. S. D. **Determinantes da demanda internacional por café brasileiro**. Brasília: Revista de Política Agrícola, 2015.

DICKEY, D.A.; FULLER, W.A. **Distributions of The Estimators For Autoregressive Time Series With a Unit Root**. Washington: Journal of the American Statistical Association, 1979.

DICKEY, D.A.; FULLER, W.A. **Likelihood Ratio Statistics for Autoregressive Time Series With a Unit Root**. Chicago: Econometrica, 1981

ELLIOTT, R. J.; VAN DER HOEK, J.; MALCOLM, W. P. **Pairs trading**. Reino Unido: Quantitative Finance, 2005.

ENGLE, R.; GRANGER, C. **Co-integration and error correction: Representation, estimation and testing**. Chicago: Econometrica, 1987.

FACKLER, P.L.; GPPDWIN, B.K.; **Spatial price analysis**. Holanda: Handbook of Agricultural Economics North-Holland Press, 2001.

FERRAZ, J. C.; KUPFER, D.; HAGUENAUER, L. **Made in Brazil: desafios competitivos para a indústria**. Rio de janeiro: Campus, 1995.

FERREIRA, L. **New tools for spread trading. Futures: News, Analysis & Strategies for Futures**. Chicago: Options & Derivatives Traders, 2008.

FULLER, W. **Introduction to Statistical Time Series**. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 1976.

GATEV, E.; GOETZMANN, W. N.; ROUWENHORST, K. G. **Pairs trading: Performance of a relative-value arbitrage rule**. Cary: Review of Financial Studies, 2006.

GRANGER, C. **Some properties of time series data and their use in econometric model specification.** Holanda: Journal of Econometrics, 1981.

GUTIERREZ, C. E.C.; ALMEIDA, F.M.M. **Modelagem e Previsão do Preço do Café Brasileiro.** Paraná: Revista De Economia, 2013.

HALL, H.E.; LIEBERMAN, M. **Microeconomia: princípios e aplicações.** São Paulo: Thamsom Learnig, 2003.

HARRIS, R.I.D. **Using cointegration analysis in econometric modelling.** London: Prentice Hall, 1995.

HOGAN, S.; JARROW, R.; TEO, M.; WARACHKA, M. **Testing market efficiency using statistical arbitrage with applications to momentum and value strategies.** Holanda: Journal of Financial Economics, 2024.

HUCK, N. **Pairs selection and outranking: An application to the S&P 100 index.** Holanda: European Journal of Operational Research, 2009.

HUCK, N. **Pairs trading and outranking: The multi-step-ahead forecasting case.** Holanda: European Journal of Operational Research, 2010.

HULL, J. **Introdução aos mercados futuros e de opções.** São Paulo: BM&F, 1996.

ICO. International Coffee Organization - Historical Data on the Global Coffee Trade. Disponível em: <http://www.ico.org/pt>. Acesso em: mar. e set. 2025.

INGERSOLL, J. E. **Theory of Financial Decision Making.** Londres: Bloomsbury Academic, 1987.

JOHANSEN, S. **Statistical Analysis of Cointegration Vectors.** Holanda: Journal of Economic Dynamic and Control, 1988.

JOHANSEN, S., e JUSELIUS, K. **Maximum likelihood estimation and inference on cointegration—with applications to the demand for money.** Reino Unido: Oxford Bulletin of Economics and Statistics, 1990.

JUNQUEIRA, F. Z. **Contratos futuros de café como alternativa para diminuir o risco de uma carteira.** São Paulo: Universidade de São Paulo, 2005.

JUREK, J. W.; YANG, H. (2007). **Dynamic portfolio selection in arbitrage.** Massachusetts: Working paper, 2007.

KARBUZ, S.; JUMAH, A. **Cointegration and Commodity Arbitrage.** Nova Iorque: Agribusiness, 1995.

KIM, K. **Performance analysis of pairs trading strategy utilizing high frequency data with an application to KOSPI 100 equities.** Nova Iorque: SSRN Electronic Journal, 2011.

KRAUSS, C. **Statistical Arbitrage Pairs Trading Strategies: Review and Outlook.** Reino Unido: Journal of Economic Surveys, 2016.

LIEW, R. Q.; WU, Y. **Pairs trading: A copula approach**. Londres: Journal of Derivatives & Hedge Funds, 2013.

McKINNON, Ronald I. **The order of economic liberalization: financial control in the transition to a market economy**. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1991.

MELAWANKI, M.; PRADEEPA BABU B. N.; VEDAMURTHY, K. B. **Empirical study on interdependence of coffee futures prices and farm gate prices in major coffee producing countries**. Índia: Asian Journal of Agricultural Extension, Economics & Sociology, 2025.

MIRANDA, A. P.; CORONEL, D. A.; VIEIRA, K. M. **Previsão do mercado futuro do café arábica utilizando redes neurais e métodos econométricos**. Rio Grande do Sul: Revista Estudos do CEPE, 2013.

OLIVEIRA, Carlos André Santos de. **Relevância social e econômica da cafeicultura para o Brasil**. Brasília: Conselho Nacional do Café, 2025. Disponível em: <https://cncafe.com.br/relevancia-social-e-economica-da-cafeicultura-para-o-brasil-por-carlos-andre-santos-de-oliveira-superintendente-da-ocb-es/>. Acesso em: 03 abr. 2025.

PARREIRAS, Luiz Paulo Rodrigues de Freitas. **Arbitragem estatística e inteligência artificial**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2007.

PHILLIPS, P. C. B., e OULIARIS, S. **Asymptotic Properties of Residual Based Tests for Cointegration**. Londres: Econometrica, 1990.

PHILLIPS, P.C.B.; PERRON, P. **Testing for a Unit Root in Time Series Regression**. Londres: Biometrika, 1988.

RIBEIRO, C.O.; SOSNOSKI, A. A. K. B.; OLIVEIRA, S. M. **Um modelo hierárquico para previsão de preços de commodities agrícolas**. Rio de Janeiro: Revista Produção Online, 2010.

RODRIGUES, L. S.; REZENDE, S.; MOURA, M.; MARCACINI, R. M. **Agribusiness time series forecasting using perceptually important events**. São Paulo: Latin American Computing Conference, 2018.

SAID, S. E., DICKEY, D.A. (1984) **Testing for unit roots in autoregressive moving average models of unknown order**. Londres: Biometrika, 1984.

SAES, Maria Sylvia Macchione; FARINA, Elizabeth Maria Mercier Querido. **O agribusiness do café no Brasil**. São Paulo: Milkbizz, 1999.

SANTOS, D. G. **Estimação de Volatilidade em Séries Financeiras: Modelos Aditivos Semi Paramétricos e GARCH**. Porto Alegre: UFRGS, 2008.

SANTOS, V. F.; PEREIRA, M. W. G.; BRAGA, M. J.; VIEIRA, W.C. **Análise do preço do milho nos mercados externo e interno**. Brasília: Revista de Política Agrícola, 2007.

SCHNAIDER, P. A. B.; SAES, M. S. M. **Estratégias na composição de blends no mercado internacional de café: uma análise de cointegração**. Paraná: Informe Gepec, 2013.

SCHOUCHANA, F; SHENG, H.H.; DECOTELLI, C.A. **Gestão de riscos no agronegócio: mercados futuros, opções e swaps**. Rio de Janeiro: Editora FGV, 2013.

SECRETARIA DE COMÉRCIO EXTERIOR – SECEX. Resultados do Comércio Exterior Brasileiro – Dados consolidados. Disponível em: balanca.economia.gov.br/balanca/publicacoes_dados_consolidados/pg.html. Acesso em: out. 2025.

STANDER, Y.; MARAIS, D.; BOTHA, I. **Trading strategies with copulas**. África do Sul: Journal of Economic and Financial Sciences, 2013.

STOCK, J.; WATSON, M. **Testing for common trends**. Washington: Journal of the American Statistical Association, 1988.

U.S. Department of Agriculture - USDA; **Coffee: World Markets and Trade Report**. Estados Unidos: June 25, 2025.

VERBEEK, Jesse. **Statistical Arbitrage in Commodity Markets: A Cointegration Approach**. Holanda: University of Amsterdam, 2021.

VIDYAMURTHY, G. **Pairs trading: Quantitative methods and analysis**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2004.

VILELA, E. H. P.; PENEDO, A. S. T. **Determinantes do comportamento dos preços do café brasileiro: uma abordagem de redes neurais e artificiais**. Minas Gerais: Revisata GETEC, 2023.

WILLIAMS, J. C.; WRIGHT, B. D. **Storage and commodity markets**. Nova Iorque: Cambridge university press, 2005.

WILLIAMS, J. C.; WRIGHT, B. D. **Storage and commodity markets**. Nova Iorque: Cambridge university press, 2005.

ZIVOT, E.; WANG, J. **Modelling Financial Times Series with S-Plus**. Nova Iorque: Springer-Verlag, 2003.