



Factores determinantes del precio del Crédito de Descarbonización (CBIO) e implicaciones para la política brasileña RenovaBio

Factors Determining the Price of the Decarbonization Credit (CBIO) and Implications for Brazil's RenovaBio Policy

Fatores determinantes do preço do Crédito de Descarbonização (CBIO) e implicações para a política brasileira RenovaBio

Marianna Henriques Ferreira Lima; Herlander Costa Alegre da Gama Afonso

Ingeniera Civil, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ), Investigadora Independiente. ORCID: 0009-0004-8779-3812. E-mail: limama@oregonstate.edu, Rio de Janeiro - Brasil.

Posdoctorado en Ingeniería de Transportes, Programa de Ingeniería de Transportes/Universidad Federal de Río de Janeiro (PET/UFRJ). Profesor Asociado, departamento de Ingeniería de Producción, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ). ORCID: 0000-0002-8954-3508. E-mail: herlander.afonso@cefet-rj.br, Nova Iguaçu - Brasil.

Recibido: 10 de diciembre de 2025

Aceptado: 4 de junio de 2026

DOI: <https://doi.org/10.22267/rtend.26272.301>

Cómo citar este artículo: Henriques, M. y Costa Alegre, H. (2026). Factores determinantes del precio del Crédito de Descarbonización (CBIO) e implicaciones para la política brasileña RenovaBio. *Tendencias*, 27(2), 174-200. <https://doi.org/10.22267/rtend.26272.301>

Resumen

Introducción: El calentamiento global plantea desafíos para la descarbonización económica, destacando la fijación de precios de activos ambientales como el Certificado de Descarbonización (CBIO). **Objetivo:** Analizar la influencia de variables macroeconómicas y de mercado —petróleo (WTI), gas natural, dólar (USD/BRL), índice VIX y volumen negociado en la formación de precios del CBIO bajo la política RenovaBio. **Metodología:** Se empleó una regresión lineal múltiple por Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO) en series temporales con datos diarios correspondientes a cuatro años. Se aplicaron pruebas ADF de raíz unitaria y cointegración de Engle-Granger para validar la estimación en niveles, además de la prueba de Breusch-Godfrey para autocorrelación y la reestimación mediante Errores Estándar Consistentes con Heterocedasticidad y Autocorrelación (HAC) de Newey-West. **Resultados:** El petróleo, el dólar y el VIX son predictores estadísticamente significativos del precio del CBIO, incluso tras corregir errores estándar. **Discusión:** La sensibilidad a la volatilidad externa y materias primas energéticas vincula la descarbonización brasileña a dinámicas globales, limitando la autonomía nacional ante choques externos. **Conclusiones:** El CBIO se comporta como un activo financiero sensible a variables de mercado, pero requiere mecanismos regulatorios que mitiguen la volatilidad cambiaria para incentivar inversiones estables en biocombustibles.

Palabras clave: cambio climático; economía verde; investigación económica; política energética; productos básicos.

JEL: C32; Q20; Q42; Q54; Q57.



Abstract

Introduction: Global warming poses challenges for economic decarbonization, highlighting the pricing of environmental assets such as the Decarbonization Certificate (CBIO). **Objective:** To analyze the influence of macroeconomic and market variables oil (WTI), natural gas, dollar exchange rate (USD/BRL), VIX index, and traded volume on CBIO price formation under the RenovaBio policy. **Methodology:** A multiple linear regression model estimated by Ordinary Least Squares (OLS) was applied to daily time series data spanning four years. Augmented Dickey-Fuller (ADF) unit root and Engle-Granger cointegration tests were used to validate estimation in levels, along with the Breusch-Godfrey test for autocorrelation and re-estimation using Newey-West Heteroskedasticity and Autocorrelation Consistent (HAC) standard errors. **Results:** Oil, the dollar, and the VIX are statistically significant predictors of the CBIO price, even after correcting standard errors. **Discussion:** Sensitivity to external volatility and energy commodities links Brazilian decarbonization to global dynamics, limiting national autonomy in the face of external shocks. **Conclusions:** CBIO behaves as a financial asset sensitive to market variables, but requires regulatory mechanisms to mitigate exchange rate volatility in order to incentivize stable investments in biofuels.

Keywords: climate change; green economy; economic research; energy policy; commodities.
JEL: C32; Q20; Q42; Q54; Q57.

Resumo

Introdução: O aquecimento global apresenta desafios para a descarbonização econômica, com destaque para a fixação de preços de ativos ambientais, como o Certificado de Descarbonização (CBIO). **Objetivo:** Analisar a influência de variáveis macroeconômicas e de mercado — petróleo (WTI), gás natural, dólar (USD/BRL), índice VIX e volume negociado — na formação dos preços do CBIO no âmbito da política RenovaBio. **Metodologia:** Utilizou-se uma regressão linear múltipla por Mínimos Quadrados Ordinários (MCO) em séries temporais com dados diários correspondentes a quatro anos. Foram aplicados os testes ADF de raiz unitária e de cointegração de Engle-Granger para validar a estimativa em níveis, além do teste de Breusch-Godfrey para autocorrelação e da reestimativa por meio dos Erros Padrão Consistentes com Heterocedasticidade e Autocorrelação (HAC) de Newey-West. **Resultados:** O petróleo, o dólar e o VIX são preditores estatisticamente significativos do preço do CBIO, mesmo após a correção dos erros-padrão. **Discussão:** A sensibilidade à volatilidade externa e às matérias-primas energéticas vincula a descarbonização brasileira às dinâmicas globais, limitando a autonomia nacional diante de choques externos. **Conclusões:** O CBIO se comporta como um ativo financeiro sensível às variáveis de mercado, mas requer mecanismos regulatórios que atenuem a volatilidade cambial para incentivar investimentos estáveis em biocombustíveis.

Palavras-chave: mudança climática; economia verde; pesquisa econômica; política energética; commodities.
JEL: C32; Q20; Q42; Q54; Q57.

Introducción

Las temáticas ambientales, sociales y de gobernanza resultan determinantes en las hojas de ruta corporativas actuales. Se postula que aquellas organizaciones que omitan el análisis integral de sus externalidades sociales carecen de viabilidad futura (Associação Brasileira das Entidades dos Mercados Financeiro e de Capitais [ANBIMA], 2020). Bajo esta premisa, el Estado brasileño promulgó la Política Nacional de Biocombustibles (RenovaBio) para potenciar la generación de biocombustibles y cumplir con el Acuerdo de París. El elemento central de RenovaBio es el Certificado de Descarbonización (CBIO), un instrumento que representa los esfuerzos de mitigación en la cadena de producción y comercialización de biocombustibles (Empresa de Investigación Energética [EPE], 2024). Cada certificado equivale a una tonelada de dióxido de carbono equivalente (tCO_{2e}) que se evitó emitir (Guitarrari et al., 2024).

El calentamiento global plantea desafíos significativos para la humanidad, particularmente en la reducción de emisiones derivadas de las actividades económicas. Dado que las urbes contribuyen con aproximadamente el 70% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero, resulta crucial enfocarse en la planificación urbana sostenible, el transporte y la infraestructura. En este sentido, las estrategias de mitigación efectivas incluyen la disminución de emisiones, la captura de carbono y el incremento en el uso de energías renovables y edificios energéticamente eficientes para sustentar el desarrollo sostenible y la resiliencia urbana (Al-Sayed & Alanizi, 2023).

En el contexto brasileño, los distribuidores de combustibles están obligados por ley a adquirir el CBIO en cantidades que cumplan con sus metas individuales obligatorias (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis [ANP], 2025). Las estimaciones indican que el precio del CBIO tiene el potencial de influir en el costo de los combustibles para los consumidores finales; este impacto financiero podría superar los R\$ 3 mil millones en 2025 y alcanzar los R\$ 5 mil millones para 2034 (Federação Nacional do Comércio de Combustíveis e de Lubrificantes [Fecombustíveis], 2024). Por tanto, comprender los factores que determinan el precio de este certificado es esencial para los reguladores, los productores de biocombustibles y las empresas distribuidoras.

En este escenario, este artículo tiene como objetivo analizar el impacto de las variables macroeconómicas y del mercado de materias primas en el precio del CBIO. Específicamente, se investiga la influencia de variables como el petróleo futuro (WTI), el gas natural futuro, el tipo de cambio del dólar (USD/BRL), el índice de volatilidad del mercado S&P500 VIX y el volumen de CBIO negociado.

Revisión de la literatura

A continuación, se presenta la base teórica que fundamenta esta investigación, estructurada en el funcionamiento del programa RenovaBio y en la interconexión entre el mercado energético y las variables macroeconómicas.

El programa RenovaBio y el CBIO

La política RenovaBio fue instituida por la Ley n.º 13.576/2017, con el objetivo de ampliar la presencia de biocombustibles en la matriz de transportes y fomentar su producción (EPE, 2024). El programa establece metas obligatorias de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero para un periodo de diez años, definidas anualmente por el Consejo Nacional de Política Energética (CNPE). Posteriormente, la ANP desglosa estas metas globales en objetivos individuales para cada distribuidor de combustibles, proporcionalmente a su participación de mercado en combustibles fósiles. Para este cálculo, la ANP considera factores como la eficiencia de los productores de biocombustibles certificados y las proyecciones de demanda del mercado nacional (EPE, 2025).

El CBIO es el instrumento que operativiza esta política, siendo un título escritural emitido por productores e importadores de biocombustibles tras la venta de su producción, mediante la emisión de la factura. Para cumplir con su meta, los distribuidores de combustible deben demostrar la posesión del volumen necesario de CBIO. Otras entidades y personas pueden comprar y vender estos certificados en la bolsa de valores, lo que contribuye a la fluidez y liquidez del mercado (Bento & Vieira, 2023).

De esta manera, el CBIO se inserta en una discusión más amplia, estableciendo una relación directa entre el mercado de biocombustibles y el mercado de carbono, siendo el principal instrumento de esta conexión en la matriz energética brasileña. Asimismo, el CBIO posee una naturaleza dual, donde, además de ser un activo ambiental que certifica la reducción de carbono, es también un activo financiero negociable (Bento & Vieira, 2023). Esta dinámica

de mercado, al vincular la emisión del certificado a la puntuación de eficiencia ambiental, actúa como un incentivo económico que induce ganancias de eficiencia energética en la producción de biocombustibles (Ministério de Minas e Energia [MME], 2019).

A nivel internacional, el CBIO se alinea con la tendencia de los Sistemas de Comercio de Emisiones (SCE) que buscan internalizar las externalidades negativas del carbono. No obstante, a diferencia de mercados más consolidados como el Sistema de Comercio de Emisiones de la Unión Europea (EU ETS), que opera bajo un modelo de *cap-and-trade* con límites rígidos de emisiones, el modelo brasileño se basa en la intensidad de carbono sectorial. Esta distinción estructural sugiere que el CBIO posee una sensibilidad única a las dinámicas del mercado energético interno y global, lo cual es fundamental para entender su formación de precios en comparación con otros marcos regulatorios (Bento & Vieira, 2023; UN Environment Programme Finance Initiative [UNEP FI], 2025).

A pesar del avance normativo, persiste una brecha importante en la literatura académica, mientras que gran parte de las investigaciones previas se concentran en la eficiencia técnica de la producción de biocombustibles o en el diseño regulatorio de RenovaBio (MME, 2019; EPE, 2023), existe una carencia de análisis empíricos que vinculen la volatilidad de las variables macroeconómicas globales con la tarificación del CBIO. Este estudio busca precisamente llenar ese vacío, aportando evidencia econométrica sobre cómo factores externos, como el petróleo crudo y el riesgo global, impactan la estabilidad de un activo que es, por definición, tanto ambiental como financiero (Bento & Vieira, 2023; Souza, 2024).

La cotización del CBIO está influenciada por múltiples factores de mercado; por ejemplo, el incremento en la meta de descarbonización afecta el valor de negociación, elevando la demanda de los distribuidores según EPE (2024). Además, la dinámica del precio del CBIO tiene relevancia para el sector de los combustibles, ya que el precio del petróleo crudo influye directamente en el precio del CBIO, al alterar las dinámicas de oferta y competitividad en el mercado de combustibles (NovaCana, 2019).

Interdependencia del sector energético con los indicadores macroeconómicos

La valoración del CBIO en territorio brasileño no se produce de forma aislada. El CBIO constituye un activo que se transa en un mercado de carbono regulado específicamente para el ámbito de los combustibles (Fregonesi et al., 2025). Los instrumentos de tarificación del

carbono, que abarcan tanto los mercados de créditos como los gravámenes fiscales, se consideran herramientas de alta relevancia para acelerar la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero e impulsar tecnologías de transición energética, con proyecciones que señalan un flujo financiero creciente y un vasto potencial de mercado en los próximos años (Dias, 2023).

Mecanismos como los Sistemas de Comercio de Emisiones (SCE), entre ellos RenovaBio, son fundamentales para alcanzar reducciones de emisiones de manera costo-eficiente, siempre que generen una señal de precio del carbono clara, estable y de largo plazo. Esta señal permite orientar decisiones de inversión de capital a gran escala en tecnologías de baja emisión y proyectos de mitigación, al tiempo que reduce la incertidumbre regulatoria y fortalece la previsibilidad del mercado. En ausencia de una señal consistente, estos sistemas pueden perder efectividad, limitar la movilización de recursos e inducir niveles insuficientes de inversión en procesos de descarbonización (Acworth et al., 2017).

El CBIO, al representar una tonelada de dióxido de carbono equivalente (tCO_2e) no emitida, incorpora un valor derivado del esfuerzo de descarbonización, conectándose indirectamente con la métrica del Costo Social del Carbono (CSC), la cual busca cuantificar el daño económico futuro de una tonelada de tCO_2e emitida hoy (Wagner et al., 2021). Aunque el CBIO no es el CSC, su valoración es sensible a factores que influyen tanto en el costo de los combustibles como en el apetito por inversiones en mitigación, haciendo que el análisis de variables macroeconómicas sea una necesidad para reguladores e inversores.

En el debate posterior a la COP30, el Mecanismo de Acreditación del Acuerdo de París ha reforzado un mercado global de carbono regulado por la ONU, reforzando la necesidad de transparencia y armonización regulatoria para atraer capital hacia la transición energética (Suppan, 2025; UNEP FI, 2025).

Interdependencia con el mercado de materias primas energéticas

El avance en la descarbonización del mercado regulado, ilustrado por la permuta de combustibles de origen fósil por opciones de menor impacto ambiental, evidencia la trascendencia de la interconexión dinámica con el sector de las materias primas energéticas (Bento & Vieira, 2023). Esta relación se explica por la subordinación estructural del precio de

los combustibles fósiles respecto al crudo, insumo que rivaliza directamente con los biocombustibles. Dicha competencia es precisamente la que RenovaBio busca reequilibrar, al otorgar valor económico a las externalidades positivas de los biocombustibles frente a sus equivalentes fósiles (Fregonesi et al., 2025).

Aunque el CBIO se negocia en el mercado de mostrador organizado por B3 y su precio debería variar según la relación entre oferta y demanda; su formación de precio todavía se considera incierta por los agentes negociadores, lo que genera imprevisibilidad y pocas expectativas para nuevas inversiones (Fregonesi et al., 2025). En un escenario de precios más altos del petróleo crudo, la competitividad del etanol y el biodiésel tiende a verse favorecida, lo que, teóricamente, podría reducir la presión de costos de la descarbonización. En un escenario de caída del crudo, la menor competitividad relativa de los biocombustibles puede presionar el costo final de los combustibles fósiles, aumentando la relevancia del CBIO como un costo regulatorio para los distribuidores (NovaCana, 2019).

El Gas Natural Renovable (GNR), también llamado biometano, desempeña un papel creciente y relevante en la transición energética, siendo considerado fundamental en el esfuerzo por reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Desde una perspectiva regulatoria, el biometano se enmarca como una de las vías viables para la generación de Créditos de Descarbonización (CBIO) (Teixeira et al., 2024). Sin embargo, el nivel de utilización y la competitividad de este biocombustible están intrínsecamente vinculados a sus costos de producción y, crucialmente, a la comparación de su precio con el del gas natural (Teixeira et al., 2024).

La búsqueda de fuentes de energía más limpias, estimulada por políticas como RenovaBio, crea una interconexión entre mercados. La dinámica de los precios del gas natural a nivel internacional y doméstico es un termómetro de la transición energética y puede señalar el atractivo de las inversiones en fuentes alternativas, lo que, por extensión, afecta el entorno de negociación de los CBIO (EPE, 2024).

Riesgos macroeconómicos y volatilidad global

La tarificación del carbono, ya sea por medio de un impuesto al carbono o un sistema de límite y comercio (cap-and-trade), crea incentivos a corto y largo plazo para reducir emisiones, estimulando la búsqueda de soluciones más económicas y generando

potencialmente ingresos para uso productivo (Kaufman et al., 2016). A partir de la promulgación de la Ley n.º 13.576/2017, Brasil estableció RenovaBio, un sistema que promueve el uso de energías renovables mediante un esquema de precios de carbono aplicado a la comercialización de combustibles. En este esquema, los distribuidores deben cumplir metas de descarbonización mediante la adquisición de CBIO, mientras que los productores e importadores de biocombustibles pueden generar estos certificados de forma voluntaria, siendo remunerados por su producción (Dias, 2023).

El CBIO es un valor negociable en la B3, a través de un mercado regulado que, a diferencia del mercado voluntario de carbono, divulga volúmenes, precios y fechas de negociación (Fregonesi et al., 2025). A pesar de esto, la formación de precios en el mercado regulado sigue siendo un punto de incertidumbre, lo que afecta la previsibilidad para nuevas inversiones. Al cierre de 2024, RenovaBio completó cinco años de operación y busca consolidarse como un instrumento de sostenibilidad y previsibilidad para la matriz de transporte en Brasil (EPE, 2024).

A pesar de ser una política todavía reciente y compleja, RenovaBio busca minimizar fallas en su curso. No obstante, la volatilidad en el precio del CBIO ha sido notable, como lo evidenció el año 2022, que presentó grandes oscilaciones. En 2023, el precio mostró mayor estabilidad, aunque registró una elevación en junio y un posterior descenso, el valor se estabilizó cerca de los R\$ 100,00 (US\$ 20,65) al cierre anual. El precio promedio anual del CBIO en 2023 fue de R\$ 113,59 (US\$ 23,47), valor muy cercano al registrado en 2022, que fue de R\$ 111,63 (US\$ 21,40) (EPE, 2024).

La previsibilidad de los precios futuros del carbono, asegurada por un impuesto al carbono bien estructurado, es necesaria para incentivar inversiones a largo plazo e innovación en tecnologías de baja emisión de carbono (Kaufman et al., 2016). Estudios de tarificación utilizando modelos de la familia GARCH (Heterocedasticidad Condicional Autorregresiva Generalizada) confirman la volatilidad asociada con los precios de los CBIO, subrayando la importancia de una señal de precio estable para la inversión (Souza, 2024).

La formación de precios en el sector de combustibles es sensible a los factores macroeconómicos y regulatorios. En este contexto, la adquisición obligatoria de Créditos de Descarbonización (CBIO) por parte de las distribuidoras genera costos adicionales que pueden

trasladarse a los usuarios finales, incrementando la incertidumbre sobre el precio final de los combustibles (Souza, 2024). El análisis de los registros históricos evidencia un aumento progresivo del impacto de los CBIO sobre la gasolina C, al pasar de R\$ 0,02/L en 2020 y 2021 a R\$ 0,14/L en mayo de 2024; además, las proyecciones indican que esta incidencia podría mantenerse hasta 2029, con un incremento medio estimado de R\$ 0,07/L (Souza, 2024). En consecuencia, la volatilidad del precio del CBIO representa un factor de riesgo para la planificación financiera de los agentes del mercado y para la estabilidad del sector. Esta situación adquiere mayor relevancia si se considera que la industria brasileña de petróleo y gas (O&G) es intensiva en capital y opera bajo condiciones de alta sensibilidad a los costos, con un costo de equilibrio promedio mundial de US\$ 45 por barril para la producción de reservas en 2021 (Teixeira et al., 2024).

Además, Brasil es uno de los dos mayores actores en el mercado global de etanol, junto a Estados Unidos, representando el 81% de la producción mundial de biocombustibles en 2023 (EPE, 2023). En 2024, el país fue el segundo productor global, responsable del 28% de la producción mundial (8.780 millones de galones), solo por detrás de Estados Unidos (52% de la producción, con 16.100 millones de galones) (Renewable Fuels Association, 2025). El consumo final de etanol en Brasil registró un incremento del 15,6% en 2024. La producción de etanol de maíz ha destacado, alcanzando los 7,5 mil millones de litros en 2024 y siendo responsable de cerca del 20% de la participación total de la producción de biocombustibles en 2024. La caña de azúcar continúa como la principal materia prima para el etanol anhidro (79,8% en 2024) y el etanol hidratado (80,4% en 2024). El volumen consumido de etanol hidratado en el transporte experimentó un aumento del 30,1% en 2024 comparado con 2023, debido a una mayor competitividad frente a la gasolina y una mayor disponibilidad, impulsada por el crecimiento del etanol de maíz (EPE, 2025). La sensibilidad del mercado interno al tipo de cambio se mantiene, ya que una moneda devaluada tiende a hacer más atractiva la exportación, influyendo en el precio de los biocombustibles y, en consecuencia, en la presión sobre el mercado de CBIO.

La conexión con el gas natural ocurre a través del biometano, un biocombustible gaseoso que, cuando está purificado y en conformidad con las resoluciones aplicables, es intercambiable con el gas natural. El biometano es una de las vías elegibles para generar CBIO en RenovaBio (Teixeira et al., 2024). La generación de CBIO por m³ de biometano puede incrementar los ingresos del productor entre un 15% y un 19%, considerando el precio

promedio del CBIO en 2022 de R\$ 111,60 (US\$ 21,39) y el precio de la molécula de gas natural en junio de 2023 (EPE, 2023). El conflicto entre distribuidores y productores evidencia la dificultad de equilibrar competitividad, previsibilidad regulatoria y sostenibilidad de largo plazo en el RenovaBio (Souza, 2024).

Este escenario de riesgo se amplifica en un contexto internacional marcado por políticas climáticas de gran escala, como la Ley de Reducción de la Inflación de Estados Unidos, conocida como Inflation Reduction Act (IRA, por sus siglas en inglés). Sancionada en 2022, esta normativa constituye una de las mayores inversiones del país en materia de acción climática, al destinar aproximadamente US\$ 400 mil millones a proyectos de energía limpia y descarbonización. Asimismo, la IRA establece como meta reducir las emisiones de carbono de Estados Unidos en al menos un 50% para 2030 (EPE, 2024). Este tipo de políticas incide en las expectativas de los mercados de carbono, moviliza capital hacia tecnologías bajas en carbono y puede influir en el apetito por el riesgo en economías emergentes, al modificar las condiciones globales de financiamiento e inversión asociadas a la transición energética.

Las proyecciones indican aumento del precio regulado del carbono hasta 2050, aunque persisten fuertes diferencias regionales y elevada volatilidad macroeconómica (Dias, 2023).

Metodología

La metodología de este estudio adopta un enfoque cuantitativo orientado a analizar el impacto de variables de mercado en el precio del CBIO mediante modelación econométrica, métodos estadísticos y técnicas de análisis de datos. La investigación es de naturaleza aplicada, en la medida en que busca generar conocimiento práctico para abordar el problema de la previsibilidad en la formación del precio del CBIO. Asimismo, se clasifica como una investigación documental, dado que utiliza datos secundarios y series históricas del programa RenovaBio (Gil, 2002), y como un estudio de caso, al examinar un fenómeno contemporáneo en un entorno real donde los límites entre la política regulatoria y la dinámica del mercado resultan difusos (Yin, 2001).

Para fortalecer la validez de las inferencias econométricas, se aplicó la prueba de Breusch-Godfrey, adecuada para detectar autocorrelación de orden superior en series financieras, fenómeno que puede sesgar los errores estándar y afectar la significancia estadística de los estimadores. Ante la presencia de heterocedasticidad y autocorrelación, se emplearon errores estándar consistentes ante heterocedasticidad y autocorrelación (HAC) de Newey-West, con el fin de asegurar que las pruebas t y F conservaran validez asintótica y ofrecieran resultados más robustos para la interpretación económica y regulatoria del modelo.

Modelado econométrico y selección del modelo

Se empleó la técnica de regresión lineal múltiple para explicar la relación entre una variable de respuesta y múltiples explicativas (Gujarati & Porter, 2010), expresada en la Ecuación 1:

$$Y = a + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + e_i \quad (1)$$

En esta formulación, Y_i es el precio del CBIO y la variable dependiente, a es el intercepto, β_i son los coeficientes de pendiente de las variables independientes y e_i representa el término de error estocástico (Greene, 2003). El modelo de regresión lineal es aplicable cuando la variable dependiente es cuantitativa y tiene una distribución aproximadamente normal (Alexopoulos, 2010). La estimación por Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO) consiste en seleccionar los estimadores que minimicen la suma de los residuos al cuadrado $\sum(Y - Y_{fit})^2$, siendo este el método preferido porque, bajo los supuestos del Modelo de Regresión Lineal Clásico, el Teorema de Gauss-Markov garantiza que sus estimadores son los Mejores Estimadores Lineales Insesgados. La validez de las inferencias estadísticas depende directamente de la adherencia del modelo a estos supuestos (Gujarati & Porter, 2010; Greene, 2003). Se estimaron cuatro modelos distintos, como se puede observar a continuación:

- **Modelo 1:** Los precios de las variables dependientes e independientes se normalizan para variar entre 0 y 1.
- **Modelo 2:** Los precios de las variables dependientes e independientes se normalizan para variar entre 0 y 1. Se excluyó la variable gas natural.
- **Modelo 3:** Los precios de las variables dependientes e independientes se utilizan en sus escalas originales.

- **Modelo 4:** Los precios de las variables dependientes e independientes se utilizan en sus escalas originales. Se excluyó la variable gas natural.

La exclusión de la variable gas natural en los Modelos 2 y 4 se justifica por su falta de significancia estadística observada en los Modelos 1 y 3 (p -valor $\approx 0,12145$), permitiendo la adopción de un modelo más parsimonioso. Se optó por la especificación lineal en niveles debido a la interpretación económica directa de los coeficientes sobre el precio del CBIO y a la presencia de variables con distintas escalas, lo que dificultaría la adopción de una especificación log-log sin pérdida de interpretabilidad económica.

La hipótesis principal de esta investigación es que las variables macroeconómicas y del mercado de materias primas tienen un poder explicativo significativo sobre el precio del CBIO dentro del alcance de la política RenovaBio. El estudio busca confirmar si la variación en el precio del CBIO está determinada, en parte, por factores como el petróleo crudo, el dólar, la volatilidad del mercado bursátil global (S&P500 VIX) y el volumen negociado.

La evaluación de los supuestos econométricos se realizó utilizando Errores Estándar HAC, con un ancho de banda de 7 y el Kernel de Bartlett, para asegurar la robustez de las inferencias ante la presencia de heterocedasticidad y autocorrelación. El uso de los errores estándar HAC de Newey y West se emplea en modelos de series temporales financieras para obtener estimadores consistentes de la matriz de covarianza ante la presencia de ambos problemas econométricos, asegurando la validez asintótica de las pruebas t y F .

Datos y variables

La muestra incluye 997 observaciones diarias, cubriendo el periodo del 15 de octubre de 2021 al 11 de agosto de 2025, para analizar el comportamiento del precio del CBIO. Los datos para la variable dependiente, el precio del CBIO, se extrajeron directamente de B3 S.A. (Brasil, Bolsa, Balcão); la cotización del tipo de cambio Dólar/Real se obtuvo del Banco Central de Brasil; las demás variables financieras y de mercado utilizadas, incluyendo el precio futuro del petróleo crudo (WTI), el precio futuro del gas natural y el índice de volatilidad (VIX), fueron recolectadas de la plataforma Investing.com.

En el modelo econométrico empleado, el precio del CBIO se utilizó como la variable dependiente. El precio del CBIO es explicado por las variables independientes presentadas en la Tabla 1.

Tabla 1

Variables del Modelo de Regresión Lineal

Variable	Descripción
$CBIO_t$	Precio del crédito de descarbonización
$CBIO_{t-1}$	Precio del CBIO en el período anterior
$Volumen\ CBIO_t$	Volumen de CBIO negociado
Oil_t	Precio de los futuros de petróleo crudo (WTI)
$NaturalGas_t$	Precio de los futuros de gas natural
$SP500_t$	Índice VIX asociado a la volatilidad esperada del S&P 500
$USDBRL_t$	Cambio Dólar/Real

Fuente: Elaboración propia.

La inclusión de la variable $CBIO_t$ se realizó con el objetivo de modelar la inercia del precio y la persistencia de los choques, siendo necesaria para modelos de series temporales de activos financieros. $VolumenCBIO_t$ fue necesario como un proxy de la liquidez del mercado y la presión de la demanda. La variable del precio futuro del petróleo crudo se añadió para capturar el costo de oportunidad y analizar la influencia de la principal materia prima fósil sobre los biocombustibles. El precio futuro del gas natural se añadió para comprender la influencia del mercado energético global y sus volatilidades sobre el precio del CBIO. El índice de volatilidad S&P 500 se consideró para capturar el riesgo sistémico global y el sentimiento del mercado financiero, que pueden impactar el flujo de capital hacia las materias primas. El tipo de cambio Dólar/Real se añadió para medir la influencia cambiaria en los precios de los combustibles y el CBIO, dado el impacto del tipo de cambio en los costos de las materias primas.

El análisis se condujo mediante un modelo de serie temporal de regresión lineal múltiple, expresado por la Ecuación 2:

$$CBIO_t = \beta_0 + \beta_1 \cdot CBIO_{t-1} + \beta_2 \cdot Volumen_CBIO_t + \beta_3 \cdot Oil_t + \beta_4 \cdot NaturalGas_t + \beta_5 \cdot SP500_t + \beta_6 \cdot USDBRL_t + \epsilon_t, \quad (2)$$

La principal premisa de este trabajo sostiene que la valoración del CBIO se encuentra condicionada de manera notable por un conjunto de factores macroeconómicos y de mercado. El propósito esencial radica en ratificar la hipótesis de trabajo de que al menos uno de los parámetros de las variables explicativas difiere estadísticamente de cero ($H_A: \beta_i \neq 0$) (Gujarati & Porter, 2010).

Al pretender la invalidación de la Hipótesis Nula ($H_0: \beta_i = 0$), el estudio busca corroborar que el grupo de variables integradas posee una relevancia conjunta en la fijación del precio de la variable objeto de estudio (Gujarati & Porter, 2010).

Diagnóstico y tratamiento econométrico

En modelos de series temporales, uno de los supuestos fundamentales para la validez econométrica es la estacionariedad de las variables. Una serie estacionaria presenta media, varianza y covarianza constantes a lo largo del tiempo, evitando relaciones espurias entre variables no relacionadas económicamente (da Silva, 1999). Cuando las series presentan raíz unitaria, las estimaciones por MCO pueden conducir a inferencias inválidas y coeficientes estadísticamente significativos sin relación económica real.

Conforme a la literatura econométrica, una serie integrada de orden cero $I(0)$ es estacionaria en nivel, mientras que una serie integrada de orden uno $I(1)$ requiere diferenciación para alcanzar estacionariedad (da Silva, 1999). Para verificar esta propiedad, se aplicó la prueba de Dickey-Fuller Aumentada (ADF), ampliamente utilizada en modelos de series temporales financieras.

Sin embargo, la presencia de variables integradas de orden uno $I(1)$ no implica necesariamente la diferenciación de las series. Cuando existe una combinación lineal estacionaria entre variables no estacionarias, se configura una relación de cointegración, indicando la existencia de un equilibrio de largo plazo entre ellas (Engle y Granger, 1987). En este estudio, la estacionariedad de las series fue evaluada mediante la prueba Dickey-Fuller Aumentada (ADF), especificada con intercepto (constante), sin tendencia determinística y selección automática de rezagos a partir del Criterio de Información de Akaike (AIC). La utilización exclusiva de la prueba ADF se justifica por su amplia aceptación en la literatura econométrica y por constituir el procedimiento estándar del enfoque de cointegración de Engle-Granger adoptado en esta investigación. Tras identificar variables integradas de orden uno, se

aplicó la prueba de cointegración de Engle-Granger, la cual confirmó la estacionariedad de los residuos del modelo. Por consiguiente, se optó por mantener las variables en niveles, dado que la estimación no resulta espuria y los coeficientes pueden interpretarse como relaciones económicas de largo plazo entre las variables analizadas.

Para asegurar que las inferencias estadísticas y los estimadores de MCO sean los Mejores Estimadores Lineales Insesgados, es fundamental verificar la validez de los supuestos de la regresión lineal clásica (Gujarati y Porter, 2010). La no satisfacción de estos supuestos requiere la aplicación de métodos de corrección, como los Errores Estándar Robustos (HAC), ya utilizados en este estudio.

Esta investigación reconoce como una limitación metodológica la opción por el modelo de regresión lineal múltiple vía MCO, el cual, aunque robusto tras el uso de los Errores Estándar HAC de Newey y West (1987), no modela explícitamente la volatilidad condicional de la serie de precios del CBIO, la cual sería mejor explorada con la aplicación de modelos de la familia GARCH (*Generalized Autoregressive Conditional Heteroscedasticity*).

Prueba de normalidad de residuos (Jarque-Bera)

El supuesto de normalidad de los errores [$\epsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$] permite aplicar pruebas t y F en muestras pequeñas (Gujarati y Porter, 2010). En muestras grandes, los estimadores MCO tienden a la normalidad asintótica por el Teorema del Límite Central (Greene, 2003). La prueba de Jarque-Bera (JB) evalúa la normalidad de los residuos mediante asimetría y curtosis (Jarque & Bera, 1987).

Prueba de autocorrelación serial (Breusch-Godfrey)

La autocorrelación ocurre cuando los términos de error están correlacionados entre sí (Gujarati y Porter, 2010), generando errores estándar sesgados e invalidando pruebas de significancia (Greene, 2003). Para detectar autocorrelación de un orden superior, se utiliza la prueba de Breusch-Godfrey (BG), también conocida como la prueba del Multiplicador de Lagrange. Esta prueba es más flexible que la prueba de Durbin-Watson, ya que permite probar la autocorrelación de orden p. La prueba BG implica una regresión auxiliar de los residuos MCO (Breusch, 1978).

El estadístico de la prueba BG sigue una distribución Chi-Cuadrado χ^2 con p grados de libertad. La hipótesis nula es la ausencia de autocorrelación en los residuos $H_0 : \rho_1 = \dots \cdot \rho_p = 0$ (Breusch, 1978).

En esta prueba, un p-valor mayor que el nivel de significancia implica el no rechazo de la hipótesis nula, indicando que no hay autocorrelación significativa en los residuos para el orden probado. En el caso del presente estudio, la hipótesis nula H_0 es que no hay autocorrelación serial en los residuos de la regresión.

Prueba de heterocedasticidad

La heterocedasticidad ocurre cuando la varianza de los errores no es constante, ($\text{Var}(\epsilon_i) \neq \sigma^2$). Aunque los estimadores MCO permanecen insesgados, dejan de ser eficientes. La prueba de Breusch-Pagan se utiliza frecuentemente para verificar la hipótesis nula de homocedasticidad (Gujarati & Porter, 2010). En esta prueba, el rechazo de la hipótesis nula, indicado por un p-valor por debajo del nivel de significancia, confirma la presencia de heterocedasticidad (Breusch, 1978).

Resultados

El desempeño de los modelos fue evaluado a través de métricas como el Coeficiente de Determinación Ajustado (R^2), el Estadístico F y el AIC y el Criterio Bayesiano de Schwarz (BIC); estas solo se comparan dentro de cada grupo de escala. Todos los modelos demostraron un alto poder explicativo, con un R^2 alrededor de 0,963 y un Estadístico F con p-valor $< 0,00001$, confirmando la relevancia conjunta de las variables (Tabla 2). El rechazo de la hipótesis nula con un p-valor tan bajo confirma que las variables explicativas poseen poder predictivo estadísticamente significativo sobre el precio del CBIO.

Tabla 2

Modelos de regresión lineal

Métrica	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
R ² ajustado	0,963289	0,963240	0,963289	0,963240
P-valor (Estadístico F)	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001
AIC	-4.077,38	-4.077,05	6.231,44	6.231,76
BIC	-4.043,04	-4.047,63	6.265,77	6.261,19
Durbin-Watson	2,590740	2,592820	2,590740	2,592820
Autocorr. Primer orden	-0,296210	-0,297304	-0,296210	-0,297304

Fuente: Elaboración propia.

Para la selección del modelo más adecuado, el AIC y el Criterio Bayesiano de Schwarz (BIC) son herramientas necesarias, ya que penalizan los modelos con un mayor número de parámetros, favoreciendo la parsimonia (Alexopoulos, 2010).

En la comparación entre los modelos normalizados 1 y 2, se observó que el Modelo 1 tuvo el AIC más bajo (-4077,38), mientras que el Modelo 2 presentó el BIC más bajo (-4047,63). Esto representa una potencial divergencia en la elección, porque el AIC (Modelo 1) indica un mejor desempeño predictivo general, mientras que el BIC (Modelo 2), al penalizar más severamente el número de variables, sugiere que el modelo reducido es el más parsimonioso en términos de variables incluidas, siendo preferible cuando el objetivo es simplificar la estructura del modelo.

Del mismo modo, la comparación entre los modelos no normalizados 3 y 4 evidenció una diferencia en los criterios de selección. El Modelo 3 presentó el menor AIC (6231,44), lo que sugiere un mejor desempeño relativo en términos de ajuste predictivo; mientras que el Modelo 4 registró el menor BIC, indicando una mayor parsimonia al penalizar con mayor rigurosidad el número de parámetros incluidos. Por tanto, no existe un consenso pleno entre ambos criterios: el AIC favorece al Modelo 3, mientras que el BIC respalda al Modelo 4 como una alternativa más parsimoniosa entre los modelos no normalizados.

Sin embargo, la exclusión de la variable gas natural, que no fue estadísticamente significativa en los Modelos 1 y 3 (p-valor = 0,12145), se justifica con base en el principio de parsimonia. El objetivo es obtener la relación explicativa más alta con el número mínimo de

variables independientes (Greene, 2003). Así, el Modelo 4 (no normalizado, reducido), que minimiza el BIC en su grupo, se considera el más apropiado para la interpretación de los efectos, ya que mantener la escala original del precio del CBIO facilita la comprensión directa del impacto económico de los predictores.

El valor $DW > 2$ sugiere posible autocorrelación negativa; por ello se complementó con Breusch-Godfrey y errores HAC (Gujarati y Porter, 2010).

Interpretación del modelo seleccionado

La interpretación de los coeficientes en la Regresión Múltiple debe realizarse bajo la condición de *ceteris paribus*. El coeficiente de pendiente parcial, β_i , representa la variación en el valor promedio de la variable dependiente (Y, precio del CBIO) por cada aumento de una unidad en la variable explicativa (X), manteniendo constantes los valores de todas las demás variables incluidas en el modelo (Gujarati y Porter, 2010).

El Modelo 4, que utiliza variables en su escala original (no normalizadas) e incluye solo variables estadísticamente significativas al 10%, presentó los siguientes resultados, resumidos en la Tabla 3.

Tabla 3

Resultados del Modelo 4 de Regresión Lineal

Variable independiente	Coefficiente	Estadístico t	P-valor	Significancia
$CBIO_{t-1}$	0,956167	51,212000	<0,00001	***
$Volumen_CBIO_t$	0,000005	5,793000	<0,00001	***
Oil_t	0,03	1,77	0,08	*
$SP500_t$	0,04	3,06	0,00	***
$USDBRL_t$	-2,102860	-1,986000	0,047330	**
const	10,125300	1,351000	0,176890	n.s.

Nota: Signif.: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,05$; * $p < 0,1$.

Fuente: Elaboración propia.

Sustituyendo los valores de los coeficientes estimados de la Tabla 3 en la Ecuación 2, la ecuación final del modelo, para la interpretación económica, es la Ecuación 3:

$$CBIO_t = 10,1253 + 0,956167 \cdot CBIO_{t-1} + 0,00000479 \cdot Volumen_CBIO_t + 0,0343434 \cdot Oil_t + 0,0434453 \cdot SP500_t - 2,10286 \cdot USDBRL_t + \epsilon_t \quad (3)$$

Para facilitar la interpretación económica, el precio promedio del CBIO (Y) se fijó en R\$ 100,00 para el análisis de semielasticidad. Los coeficientes estimados revelan los siguientes impactos:

- **Volumen_CBIO:** Con un coeficiente positivo de $4,78798 \times 10^{-6}$ y alta significancia (p-valor $< 0,00001$), el volumen negociado impacta positivamente el precio. Esto puede reflejar que el aumento en la liquidez y la demanda en el mercado eleva el valor del certificado.
- **Oil:** El coeficiente positivo de 0,0343434 es significativo al 10% (p-valor = 0,07729), indicando que un aumento de US\$ 1,00 en el precio futuro del petróleo crudo (WTI) resulta en un incremento promedio de aproximadamente 0,034% en el precio del CBIO, manteniendo las otras variables constantes. Este resultado captura el costo de oportunidad entre el combustible fósil y el biocombustible.
- **SP500:** El índice S&P 500 presentó un coeficiente positivo de 0,0434453, altamente significativo (p-valor = 0,00225). Este resultado sugiere que, a medida que el mercado bursátil global y el sentimiento de riesgo mejoran, hay un impacto positivo en el CBIO. Esto puede reflejar que el activo es, en parte, visto como una inversión financiera que se beneficia de un entorno de mayor confianza y flujo de capital.
- **USDBRL:** Con un coeficiente negativo de -2,10286, significativo al 5% (p-valor = 0,04733), el tipo de cambio ejerce una influencia inversa. Por cada aumento de una unidad en la cotización del dólar (depreciación del real), el precio del CBIO se reduce en aproximadamente 2,10%, manteniendo el control sobre las demás variables. Esto puede estar vinculado a la sensibilidad de los costos de producción y exportación de biocombustibles en Brasil.
- **Natural_Gas:** La variable gas natural fue excluida del Modelo 4 porque presentó un p-valor de 0,12145 en los modelos iniciales, lo que la hace estadísticamente no significativa al 10%.

El Modelo 4 confirma que el CBIO está determinado por la liquidez, el petróleo, el mercado global y el tipo de cambio, evidenciando su complejidad.

Análisis de estacionariedad y cointegración

Dado el carácter de series temporales del modelo, se evaluó la estacionariedad de las variables mediante la prueba de Dickey-Fuller Aumentada (ADF). Los resultados se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4

Resultados de la prueba Dickey-Fuller aumentada ADF

Variable	Estadístico ADF	p-valor	Orden de integración
CBIO	-1,984	0,294	I(1)
CBIOt-1	-1,966	0,302	I(1)
Oil_t	-1,517	0,525	I(1)
Natural_Gas	-1,841	0,3608	I(1)
SP5500	-6,258	<0,001	I(0)
USDBRL_t	-2,942	0,040	I(0)
Volumen_CBIOt	-18,331	<0,001	I(0)

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados en la Tabla 4 indican que variables como el CBIO, CBIOt-1, Oilt y Natural_Gas presentan no estacionariedad en niveles (I(1)), mientras que otras variables son estacionarias en nivel (I(0)). Ante este resultado, se aplicó el procedimiento de cointegración de Engle-Granger. La prueba ADF aplicada a los residuos del Modelo 4 confirmó su estacionariedad, evidenciando la existencia de una relación de cointegración y de equilibrio de largo plazo entre las variables analizadas.

Los resultados de la prueba de cointegración de Engle-Granger aplicada a los residuos del Modelo 4 se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5

Resultados de la prueba ADF aplicada a los residuos del modelo (Engle-Granger)

Variable	Estadístico	p-valor	Conclusión
Residuos (\hat{u}_t)	-31,791	6,389e-058	Estacionarios

Fuente: Elaboración propia.

Este resultado valida la estimación en niveles adoptada en el estudio y descarta la presencia de regresiones espurias. La evidencia de cointegración indica que las variables mantienen una relación de equilibrio de largo plazo, permitiendo interpretar los coeficientes estimados como vínculos económicos de largo plazo entre el precio del CBIO y sus determinantes.

Discusión

La formación del precio del CBIO en el mercado brasileño no ocurre de forma aislada, sino que responde a una interdependencia dinámica con el sector energético global. Los resultados obtenidos confirman la hipótesis de que variables como el petróleo crudo (WTI) y el tipo de cambio (USD/BRL) condicionan significativamente la valoración del activo.

La influencia positiva del petróleo refleja el costo de oportunidad entre combustibles fósiles y biocombustibles; un aumento en el precio del crudo mejora la competitividad del etanol y el biodiésel, lo que incrementa la demanda de CBIO y, por ende, su valor. Por el contrario, la relación negativa de mayor magnitud relativa con el tipo de cambio sugiere que una depreciación del real afecta los costos de producción y las decisiones de exportación de la matriz de biocombustibles, presionando a la baja el precio del certificado en el mercado regulado interno.

En el contexto internacional, las políticas brasileñas presentan distinciones estructurales. Mientras el EU ETS opera bajo un modelo de cap-and-trade con techos industriales (European Union, 2016), el RenovaBio se centra en la intensidad de carbono sectorial. Comparado con el Low Carbon Fuel Standard (LCFS) de California, que estimula directamente la innovación y electrificación (Courtis, 2013), el CBIO brasileño posee una dependencia mucho más acentuada de las materias primas energéticas (WTI) y la volatilidad cambiaria. Esto sugiere que el modelo brasileño está más expuesto a choques externos que sus pares internacionales.

Esta comparación revela que, aunque el RenovaBio se alinea con los esfuerzos globales de descarbonización del Acuerdo de París, su naturaleza dual lo hace más vulnerable a choques externos. La relevancia estadística del índice S&P 500 VIX refuerza esta visión, indicando que

el apetito por el riesgo global impacta el flujo de capital hacia el mercado de carbono brasileño, tratándolo en parte como un activo financiero especulativo.

Adicionalmente, la confirmación de la cointegración entre las variables refuerza la interpretación de los resultados obtenidos en términos de relaciones de largo plazo. La estacionariedad de los residuos del modelo indica la existencia de una relación de equilibrio de largo plazo, lo que permite descartar la presencia de regresión espuria. En este sentido, los coeficientes estimados reflejan vínculos económicos consistentes entre el precio del CBIO y las variables macroeconómicas analizadas.

Conclusiones

El compromiso derivado del Acuerdo de París y la urgencia por descarbonizar la matriz económica otorgan una importancia capital a esta investigación. El estudio es fundamental porque revela que la efectividad del RenovaBio, un pilar de la política pública brasileña, no depende únicamente de metas sectoriales, sino que está profundamente condicionada por dinámicas globales. Al utilizar un modelo de regresión lineal con corrección HAC de Newey-West, se logró identificar con precisión qué factores realmente mueven el precio del activo ambiental en un horizonte de cuatro años.

Los hallazgos clave demuestran la robustez de los modelos estimados, con un R^2 ajustado ≈ 0.963 , y confirman que el volumen, el petróleo (WTI), el riesgo global (VIX) y el tipo de cambio son los principales predictores estadísticamente significativos del precio del CBIO. El descubrimiento más relevante es la dualidad del CBIO como activo financiero y materia prima: mientras el petróleo ejerce un impacto positivo (0,034), la tasa de cambio (USD/BRL) presenta una influencia negativa significativamente más intensa (-2,10). Además, la correlación positiva con el S&P 500 indica que el CBIO se beneficia del apetito de riesgo y del flujo de capital internacional.

Estas evidencias tienen implicaciones críticas para la política pública. Los resultados sugieren que el RenovaBio, aunque robusto, es vulnerable a choques externos fuera del control del regulador. Por ello, se recomienda la implementación de mecanismos de protección, como

bandas de precios o fondos de estabilización, que mitiguen la volatilidad cambiaria. Estas medidas son esenciales para que el CBIO se posicione como una señal económica estable, capaz de incentivar inversiones de largo plazo en la industria de biocombustibles bajo marcos regulatorios más predecibles.

Desde el punto de vista metodológico, la incorporación de pruebas de raíz unitaria y cointegración permitió validar la especificación econométrica del modelo. La evidencia de cointegración encontrada para las variables analizadas indica que los resultados no son espurios y reflejan una relación de equilibrio de largo plazo entre el precio del CBIO y las variables macroeconómicas analizadas. Como limitación, el modelo MCO no captura la volatilidad condicional típica de activos financieros ni las dinámicas de corto plazo, aspectos que pueden explorarse en investigaciones futuras mediante Modelos de Corrección de Errores Vectoriales (VECM).

Consideraciones éticas

La presente investigación no requirió de aval ético debido a que se basó en documentos de instancias gubernamentales. De igual manera, en esta investigación no se recurrió de aval de un Comité de Ética o Bioética dado que no utilizó ningún recurso vivo, agente, muestra biológica o datos personales que representen algún riesgo sobre la vida, el ambiente o los derechos humanos.

Conflicto de interés

Todos los autores realizaron aportes significativos al documento y declaran que no existe ningún conflicto de interés relacionado con este artículo.

Declaración de contribución de los autores

Marianna Henriques Ferreira Lima: conceptualización, metodología, software, validación, análisis formal, investigación, curación de datos, escritura - borrador original, redacción: revisión y edición.

Herlander Costa Alegre Da Gama Afonso: conceptualización, metodología, validación, análisis formal, investigación, redacción: revisión y edición; supervisión.

Fuente de financiación

Esta investigación se llevó a cabo sin ninguna fuente de financiación procedente de entidades públicas o privadas. Los investigadores estuvieron motivados únicamente por la pertinencia y la actualidad del tema objeto de estudio.

Referencias

- (1) Acworth, W., Ackva, J., Haug, C., Montes de Oca, M., Fuss, S., Flachslund, C., Koch, N., Kornek, U., Knopf, B., Edenhofer, O., & Burtraw, D. (2017). *Emissions trading and the role of a long-run carbon price signal: Achieving cost-effective emission reductions under an emissions trading system*. International Carbon Action Partnership. https://icapcarbonaction.com/system/files/document/icap_long-run-carbon-price-signal.pdf
- (2) Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis [ANP]. (2025, abril 2). *Metas individuais compulsórias definitivas de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa para 2025*. Ministério de Minas e Energia. <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio/metas-individuais-compulsorias-definitivas-de-reducao-de-emissoes-de-gases-causadores-do-efeito-estufa-para-2025>
- (3) Alexopoulos, E. C. (2010). Introduction to multivariate regression analysis. *Hippokratia*, 14(Suppl 1), 23–28. <http://www.hippokratia.gr/images/PDF/14Sup1/734.pdf>
- (4) Al-Sayed, M. M. & Alanizi, A. (2023). Resilient cities to mitigate effects of climate change. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1129(1), 012029. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1129/1/012029>.
- (5) Associação Brasileira das Entidades dos Mercados Financeiro e de Capitais [ANBIMA]. (2020). *Operationalization guide: CBIO – Biofuel Decarbonization Credit*. ANBIMA. <https://www.anbima.com.br/data/files/AD/16/A6/72/E6CCB710D9114AB76B2BA2A8/Guia%20de%20CBIO%20EN.pdf>
- (6) Bento, J. A. do N., & Vieira Filho, J. E. R. (2023). O crédito de descarbonização (CBIO) e sua relação com o mercado de carbono. En J. E. R. Vieira Filho & J. G. Gasques (Eds.), *Agropecuária Brasileira: evolução, resiliência e oportunidades* (Vol. 1, Cap. 12).

- Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea).
<http://dx.doi.org/10.38116/9786556350530cap12>
- (7) Breusch, T. S. (1978). *Some Aspects of Statistical Inference for Econometrics* [Tese de Doutorado]. Australian National University.
<https://www.semanticscholar.org/paper/Some-aspects-of-statistical-inference-for-Breusch/01c2c75edb879f561c0e7c22a894616471e9452f>
- (8) Courtis, J. (2013). *The California Low Carbon Fuel Standard*. IEA Bioenergy. <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2013/09/ExCo63-P12-The-California-Low-Carbon-Fuel-Standard-J.-Courtis.pdf>
- (9) da Silva, A. (1999). *Econometria II: Modelos DL e ADL, raízes unitárias e cointegração: uma introdução*. Instituto Superior de Economia e Gestão, Universidade Técnica de Lisboa.
- (10) Dias, B. (2023). *Cenários de descarbonização: oportunidades e incertezas da precificação de carbono*. Strategy&. https://www.strategyand.pwc.com/br/pt/relatorios/tl_precificacao_de_carbono.pdf
- (11) Empresa de Pesquisa Energética [EPE]. (2023). *RenovaBio*. Ministério de Minas e Energia. <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/renovabio>
- (12) Empresa de Pesquisa Energética [EPE]. (2024). *Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis 2024*. Ministério de Minas e Energia. <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/analise-de-conjuntura-dos-biocombustiveis-2024>
- (13) Empresa de Pesquisa Energética [EPE]. (2025). *BEN 2025: Relatório síntese – Ano base 2024*. Ministério de Minas e Energia. <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes>
- (14) Engle, R. F. & Granger, C. W. (1987). Co-Integration and Error Correction: Representation, Estimation, and Testing. *Econometrica*, 55(2), 251–276. <https://doi.org/10.2307/1913236>
- (15) European Union. (2016). *The EU Emissions Trading System (EU ETS)*. Publications Office of the European Union. <https://ec.europa.eu/clima>
- (16) Federação Nacional do Comércio de Combustíveis e de Lubrificantes [Fecombustíveis].
-

- (2024, octubre 4). *RenovaBio pode gerar impacto de R\$ 3 bi no preço dos combustíveis em 2025*. <https://www.fecombustiveis.org.br/noticia/renovabio-pode-gerar-impacto-de-r-3-bi-no-preco-dos-combustiveis-em-2025/258667>
- (17) Fregonesi, M. S., Martins, V. G. & Bezerra, F. A. (2025). Accounting Choices and Financial Position in Brazilian Carbon Credit Markets. *International Journal of Business Administration*, 16(1), 92–107. <https://doi.org/10.5430/ijba.v16n1p92>
- (18) Gil, A. C. (2002). *Como elaborar projetos de pesquisa* (4.ª ed.). São Paulo: Editora Atlas. https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/150/o/Anexo_C1_como_elaborar_projeto_de_pesquisa_-_antonio_carlos_gil.pdf
- (19) Greene, W. H. (2003). *Econometric analysis* (5th ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall. https://www.ctanujit.org/uploads/2/5/3/9/25393293/_econometric_analysis_by_greene.pdf
- (20) Guitarrari, L., Aguiar, A. B., & Marques, J. V. (2024). *O mercado de carbono no Brasil: Desafios para a harmonização com mecanismos setoriais – RenovaBio*. FGV Energia. https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/opiniao_mercado_de_carbono_13-01-2024.pdf
- (21) Gujarati, D. N., & Porter, D. C. (2010). *Econometría* (5.ª ed.). México: McGraw-Hill. <https://files.uagrm.edu.bo/entidad/161/file/indexed/Ecomod/Análisis%20econométrico%20con%20Eviews%209/Econometria-Damodar-N-Gujarati-5ta%20Ed.pdf>
- (22) Jarque, C. M., & Bera, A. K. (1987). A test for normality of observations and regression residuals. *International Statistical Review*, 55(2), 163–172. <https://doi.org/10.2307/1403192>
- (23) Kaufman, N., Obeiter, M., & Krause, E. (2016). *Putting a price on carbon: Reducing emissions* (Issue brief). World Resources Institute. https://www.ourenergypolicy.org/wp-content/uploads/2016/01/Putting_a_Price_on_Carbon_Emissions.pdf
- (24) Ministério de Minas e Energia [MME]. (2019). *Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis*. <https://antigo.mme.gov.br/web/guest/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/>

- (25) Newey, W. & West, K. (1987). A simple, positive semi-definite, heteroskedasticity and autocorrelation consistent covariance matrix. *Econometrica*, 55(3), 703–708. <https://doi.org/10.2307/1913610>
- (26) NovaCana. (2019, febrero 26). *O preço dos CBios em análise: Mercado de petróleo terá influência direta no RenovaBio*. <https://www.novacana.com/noticias/preco-cbios-analise-mercado-petroleo-influencia-direta-renovabio-260219>
- (27) Renewable Fuels Association. (2025). *Annual Industry Outlook*. <https://ethanolrfa.org/resources/annual-industry-outlook>
- (28) Souza, I. E. (2024). Impacto e projeção dos preços dos Créditos de Descarbonização (CBIOs) sobre o preço da gasolina C no Brasil. *Revista Contemporânea (Caruaru)*, 4(8), 01–21. <https://doi.org/10.56083/RCV4N8-065>
- (29) Suppan, S. (2025, noviembre 14). *COP30 rules for carbon markets: Will the new PACM removals strategy reduce emissions?* Institute for Agriculture & Trade Policy. <https://www.iatp.org/cop30-rules-carbon-markets>
- (30) Teixeira, C. A. N., Costa, R. C. da, Mendes, A. P. do A., & Rocio, M. A. R. (2024). *A hora do biometano no Brasil*, (159). Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES). https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/24146/1/PRFol_216049_TD%20n.%20159_A%20hora%20do%20biometano%20no%20Brasi.pdf
- (31) UN Environment Programme Finance Initiative [UNEP FI]. (2025, noviembre 12). *Road to COP30: UN-regulated carbon market—the risks and opportunities for financial institutions*. <https://www.unepfi.org/themes/climate-change/road-to-cop30-un-regulated-carbon-market-the-risks-and-opportunities-for-financial-institutions/>
- (32) Wagner, G., Anthoff, D., Cropper, M., Dietz, S., Gillingham, K. T., Groom, B., Kelleher, J. P., Moore, F. C. & Stock, J. H. (2021). Eight priorities for calculating the social cost of carbon. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/d41586-021-00441-0>
- (33) Yin, R. K. (2001). *Estudo de caso: Planejamento e métodos* (2.^a ed.). Porto Alegre: Bookman. http://maratavarespsictics.pbworks.com/w/file/74304716/3-YIN-planejamento_metodologia.pdf