

Relación entre el comportamiento de los precios de energía limpia y del petróleo en el mercado  
de valores

Camilo Eduardo Rondón Perez

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Industrial

Director

Olga Patricia Chacón Arias

Doctorado en Ciencias Administrativas

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas

Escuela de Estudios Industriales y Empresariales

Bucaramanga

2024

En primer lugar, quiero darle gracias a Dios por este gran logro en mi vida, gracias infinitas a mis padres por haberme brindado la oportunidad de estudiar, además que su apoyo incondicional en cada momento de este proceso fue fundamental para lograr la meta final, a mis abuelos que hicieron parte de toda mi vida y que ahora desde el cielo me iluminan para seguir adelante con mis proyectos.

Estoy muy agradecido con mi novia Andrea cuyo respaldo constante ha sido clave en la realización de este proyecto. Aquí en Australia, siempre estuvo a mi lado, brindándome su ánimo y cariño, dándome la fuerza para seguir adelante en los momentos difíciles.

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi directora de proyecto de grado, la profesora Olga Chacón, la cual a partir de su dedicación y guía constante contribuyo para que pudiera culminar esta instancia tan anhelada. Su paciencia y comprensión en este proceso fue esencial para terminar este proyecto desde la distancia.

Extiendo mi agradecimiento a la universidad a la cual pertenezco. Un sincero agradecimiento a los docentes por transmitirme los conocimientos necesarios para hoy poder estar aquí. A todos mis compañeros y amigos que compartieron conmigo momentos de alegría y estrés durante este camino.

**Tabla de Contenido**

Introducción.....	11
1. Objetivos.....	14
1.1 Objetivo General.....	14
1.2 Objetivos Específicos.....	14
2. Resultados esperados.....	14
3. Revisión de la literatura.....	15
3.1 Análisis bibliométrico .....	15
3.2 Análisis preliminar de la literatura.....	23
4. Planteamiento del problema .....	27
5. Marco de referencia.....	28
5.1 Marco de antecedentes .....	28
5.2 Marco teórico.....	31
5.2.1 Mercado financiero.....	31
5.2.2 Energía renovable.....	31
5.2.3 Energía hidroeléctrica.....	32
5.2.4 Mercado de energía .....	32
5.2.5 Mercado de energía en Colombia.....	33
5.2.6 Petróleo .....	33
5.2.7 Mercado del petróleo .....	33
5.2.8 Petróleo Brent .....	34

5.2.9 Mercados Eficientes .....	34
5.2.10 Mínimos Cuadrados Ordinarios .....	36
5.2.11 Prueba de Dickey Fuller Aumentada. ....	36
5.2.12 Proceso Estocástico .....	37
5.2.13 Proceso Estocástico Estacionario .....	37
5.2.14 Proceso Estocástico no Estacionario .....	37
5.2.15 Análisis de fluctuación sin tendencia (DFA) .....	38
5.2.16 Análisis de correlación cruzada sin tendencia (DCCA) .....	38
6. Metodología .....	39
6.1 Etapa I: Datos.....	39
6.2 Etapa II: Test Estacionariedad. ....	40
6.3 Etapa III: Análisis de correlación con el método de análisis de fluctuación sin tendencia (DFA) 41	41
6.4 Etapa IV: Aplicar el método análisis de correlación cruzada sin tendencia (DCCA) ..	42
7. Datos y resultados .....	43
7.1 Análisis estadístico.....	43
7.2 Test de raíz unitaria .....	45
7.3 Análisis de correlación con el método de análisis de fluctuación sin tendencia (DFA) 46	46
7.3.1. Análisis DFA para los precios de la energía .....	46
7.3.2. Análisis DFA para los precios del petróleo .....	50
7.4 Análisis de correlación por el método de análisis de correlación cruzada sin tendencia (DCCA) 54	54

8.	Conclusiones.....	55
9.	Recomendaciones.....	58
	Referencias bibliográficas .....	59

### Lista de Figuras

<b>Figura 1</b> Publicaciones por año .....	17
<b>Figura 2</b> <i>Publicaciones por país o territorio</i> .....	18
<b>Figura 3</b> <i>Cantidad de publicaciones por autor y coautoría entre ellos, para la primera ecuación de búsqueda</i> .....	20
<b>Figura 4</b> <i>Cantidad de publicaciones por autor y coautoría entre ellos, para la segunda ecuación de búsqueda</i> .....	21
<b>Figura 5</b> <i>Coocurrencia de palabras clave, para la primera ecuación de búsqueda</i> .....	22
<b>Figura 6</b> <i>Coocurrencia de palabras clave, para la segunda ecuación de búsqueda</i> .....	23
<b>Figura 7</b> <i>Comportamiento serie de datos de los precios del mercado energético en Colombia</i> .....	46
<b>Figura 8</b> <i>Proceso gráfico de la función del DFA para los precios de la energía</i> .....	48
<b>Figura 9</b> <i>Recta de la regresión lineal para el DFA de los precios de la energía</i> .....	48
<b>Figura 10</b> <i>Comportamiento serie de datos de los precios del petróleo Brent</i> .....	50
<b>Figura 11</b> <i>Proceso gráfico de la función del DFA para los precios del petróleo Brent</i> ..	52
<b>Figura 12</b> <i>Recta de la regresión lineal para el DFA de los precios del petróleo Brent</i> ..	52

**Lista de Tablas**

**Tabla 1** *Análisis estadístico preliminar* .....43

**Tabla 2** *Prueba raíz unitaria* .....45

**Lista de apéndices**

Apéndice A. Datos precios de la energía y del petróleo Brent.

Apéndice B. Artículo de carácter publicable.

Ver apéndices adjuntos y pueden ser consultados en la base de datos de la Biblioteca UIS

## Resumen

**Título:** Relación entre el comportamiento de los precios de energía limpia y del petróleo en el mercado de valores \*

**Autores:** Camilo Eduardo Rondón Perez \*\*

**Palabras Claves:** Energía limpia, petróleo, mercado de valores, análisis de fluctuación sin tendencia, análisis de correlación cruzada sin tendencia.

**Descripción:** Considerando la importancia de las energías limpias en el contexto económico actual, se han desarrollado diversos estudios que evidencian la relación entre el mercado de energía limpia y el petróleo, apoyados en distintos modelos econofísicos y utilizando diferentes variables de análisis para el mercado de energías limpias. Esta investigación busca aportar al conocimiento existente al enfocar la relación entre los precios de la energía limpia y el petróleo en el mercado de valores en Colombia.

La variable de estudio para los precios de la energía limpia es el mercado energético colombiano, donde la mayor parte de la energía es de origen hidráulico, y se utilizan los precios del petróleo Brent, dado que es el referente en las negociaciones internacionales de Colombia. Para este análisis se emplearon el Análisis de Fluctuación sin Tendencia (DFA) y el Análisis de Correlación Cruzada sin Tendencia (DCCA), métodos reconocidos en la literatura económica por su capacidad para detectar dependencias a largo plazo y correlaciones cruzadas en series temporales de precios. (Ferreira y Loures, 2020)

Los resultados sugieren que, en el largo plazo, los precios de la energía en Colombia y del petróleo Brent operan de manera independiente; el mercado de energía parece estar influenciado principalmente por factores internos locales, mientras que el petróleo probablemente responde a dinámicas globales.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Director: Olga Patricia Chacón Arias, Profesor UIS.

### Abstract

**Title:** Relationship between the behavior of clean energy and oil prices in the stock market. \*

**Authors:** Camilo Eduardo Rondón Perez. \*\*

**Key words:** Clean energy, oil, stock market, detrended fluctuation analysis, detrended cross-correlation analysis.

**Description:** Considering the importance of clean energy in the current economic context, various studies have been developed that show the relationship between the clean energy market and oil, supported by different econophysical models and using the clean energy market as an analysis variable. This research seeks to contribute to existing knowledge by focusing on the relationship between the prices of clean energy and oil in the stock market in Colombia.

The study variable for clean energy prices is the Colombian energy market, where most of the energy is of hydraulic origin, and Brent oil prices are used, given that it is the reference in Colombia's international negotiations. For this analysis, Trendless Fluctuation Analysis (DFA) and Trendless Cross Correlation Analysis (DCCA) were used, methods recognized in the economic literature for their ability to detect long-term dependencies and cross-correlations in price time series. (Ferreira and Loures, 2020)

The results suggest that, in the long term, energy prices in Colombia and Brent oil operate independently; The energy market seems to be influenced mainly by local internal factors, while oil probably responds to global dynamics.

---

\* Bachelor thesis

\*\* Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Director: José Alonso Caballero Márquez Profesor UIS y Codirectores: Martha Liliana Torres Barreto PhD en estrategia y marketing de la empresa y Mauricio José Martínez Pérez Profesor UIS

## Introducción

El medio ambiente durante los últimos años ha sido afectado negativamente producto de la contaminación generada por los humanos, una causa de ello es la acelerada industrialización que ha habido en el mundo, la cual genera en gran medida la emisión de dióxido de carbono a la atmósfera, sin embargo los inversionistas, las empresas comerciales y las instituciones financieras globales están dando un paso adelante hacia la descarbonización, promoviendo el uso de energías renovables como reemplazo de los combustibles fósiles (T. Kanamura, 2020). La energía limpia es un activo que se ha vuelto muy atractivo, ya que podría llegar a reemplazar a la industria de energías fósiles, por ejemplo al petróleo, siendo este uno de los productos más importantes del mundo; el poder hacer la relación entre los precios en el mercado de valores de estas dos industrias podría propiciar información importante para los actuales y futuros inversores puesto que puede mostrarse más atractivo o no para ellos, además de poder añadir un nuevo mercado en su portafolio de productos (P. Ferreira y L. C. Loures, 2020).

Desde hace tiempo en la literatura financiera se ha venido estudiando el comportamiento de los mercados financieros incluyendo en cada estudio diferentes tipos de modelos para hallar la relación existente entre mercados. El trabajo hecho por H. Zhang et al, en 2020 es un gran aporte pues muestra la relación existente entre el mercado de la energía limpia y el mercado del petróleo a partir del modelo de regresiones de cuantiles sobre cuantiles. Algunas investigaciones han usado más de un modelo para conocer la relación existente entre sus variables de estudio, como W. Ahmad, en 2017 quien aplicó 3 modelos para su análisis, GARCH-BEKK, correlaciones condicionales constantes (CCC) y correlaciones condicionales dinámicas (DCC).

Algunos estudios añaden otras variables además de la energía limpia y el petróleo, tal como J. C. Reboredo y A. Ugolini, en 2018 que a partir del modelo de cópula de vid agrega como

variables a su investigación además de la energía limpia y el petróleo, los precios del gas, la electricidad y el carbón. S. Kumar et al, en 2011 usan el modelo de auto regresión vectorial de orden  $p$  e incluyen adicionalmente en sus variables los precios de las acciones de las empresas de tecnología, los precios del carbón y las tasas de interés a corto plazo.

La mayoría de los estudios realizados se han hecho tomando índices bursátiles que agrupan empresas de energía renovable de todo el mundo como por ejemplo B. Kocaarslan y U. Soytaş, en 2019 quienes usan el índice de Energía Limpia de WilderHill (ECO) que reconoce el precio de 40 empresas de energía limpia o incluso I. Dawar et al, en 2020 quienes usan 3 índices para llevar a cabo su investigación, las cuales son el índice de energía de Wilderhill, el índice de energía solar global MAC y el índice de energía limpia global de S&P. Se han hecho algunos estudios usando variables que se enfocan en un país en específico, por ejemplo, para Pakistán el trabajo realizado por U. E. Habiba y W. Zhang, en 2020 y para China el análisis efectuado por F. Gu et al, en 2020. No hay evidencia de estudios de la relación entre el comportamiento de los precios de energía limpia y del petróleo en Latinoamérica y muy pocos con variables que apuntan a un país en específico, por ende, este estudio pretende ayudar haciendo un aporte a esa literatura enfocándolo a Colombia.

Con esta investigación se pretende hallar la relación existente entre los precios de energía limpia y del petróleo en el mercado de valores, tomando como variable de energía limpia el mercado de energía en Colombia, ya que en Colombia en su mayoría se produce la energía a partir de energía hidráulica, siendo la energía hidráulica definida en C. Spiegel y J. I. Cifuentes (2016) como una energía renovable y para el mercado de petróleo se tomaron los precios del petróleo BRENT, ambas variables se tomaron para un periodo de 10 años desde el 01 de enero del 2014

hasta el 31 de diciembre del 2023. Posteriormente se procede a usar el modelo de análisis de fluctuación sin tendencia (DFA) y el análisis de correlación cruzada sin tendencia (DCCA).

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Identificar la relación existente entre el comportamiento de los precios de energía limpia y del petróleo en el mercado de valores.

### **1.2 Objetivos Específicos**

- Realizar una revisión de la literatura científica sobre la relación entre el comportamiento de los precios de energía limpia y del petróleo en el mercado de valores.
- Seleccionar un modelo de relación entre el comportamiento de los precios de energía limpia y del petróleo en el mercado de valores.
- Verificar la relación existente entre el comportamiento de los precios de energía limpia y del petróleo en el mercado de valores a partir del modelo seleccionado.
- Elaborar un artículo de carácter publicable que contengan los hallazgos obtenidos en la investigación.

## **2. Resultados esperados**

- Revisión de la literatura donde se muestran las investigaciones que tratan acerca de la relación entre los precios de energía limpia y del petróleo.
- Evaluación de la relación existente entre los precios de energía limpia y del petróleo en Colombia.
- Artículo de carácter publicable donde se evidencien los resultados hallados en la investigación.
- Documento de tesis de pregrado en el que se muestran los resultados obtenidos.

### 3. Revisión de la literatura

#### 3.1 Análisis bibliométrico

La investigación comenzó con una búsqueda realizada a través de la herramienta virtual de la base de datos SCOPUS, que pertenece a los recursos electrónicos que están disponibles por parte de la Universidad Industrial de Santander.

Para realizar la búsqueda se usó la siguiente ecuación, la cual arrojó un total de 83 resultados.

$$TS=((energ* \text{ AND clean}) \text{ AND } ((energ* \text{ AND fossil}) \text{ OR } (\text{petroleum OR oil OR paraffin OR fusel AND oil})) \text{ AND } (\text{"stock market"} \text{ OR } \text{"stock exchange"} \text{ OR } \text{finance}) \text{ AND } (\text{influence OR impact OR relation OR effect OR correlation}))$$

Con los resultados arrojados de esta ecuación se hizo una revisión de documentos uno por uno, a los cuales se descartaron documentos que no fueran de tipo artículo y al mismo tiempo se escogieron solamente los artículos que la temática estuviera relacionada con la presente investigación, para la cual primeramente se evidenciará una relación entre variables económicas del mercado de capitales y además se corroborará que fueran ya sea en esencia o alusivas entre el mercado de energías limpias y el petróleo. Una vez aplicado este proceso de filtro se obtiene un total de 17 artículos.

Para aumentar un poco más la selección de artículos, se utiliza una segunda ecuación de búsqueda la cual había sido usada inicialmente para conocer un poco acerca del tema a tratar, teniendo en cuenta que esta contenía artículos que no se encontraban en la ecuación de búsqueda anterior y que además aportaban de gran manera a este proyecto.

$$TS=(\text{"Clean Energy Index"})$$

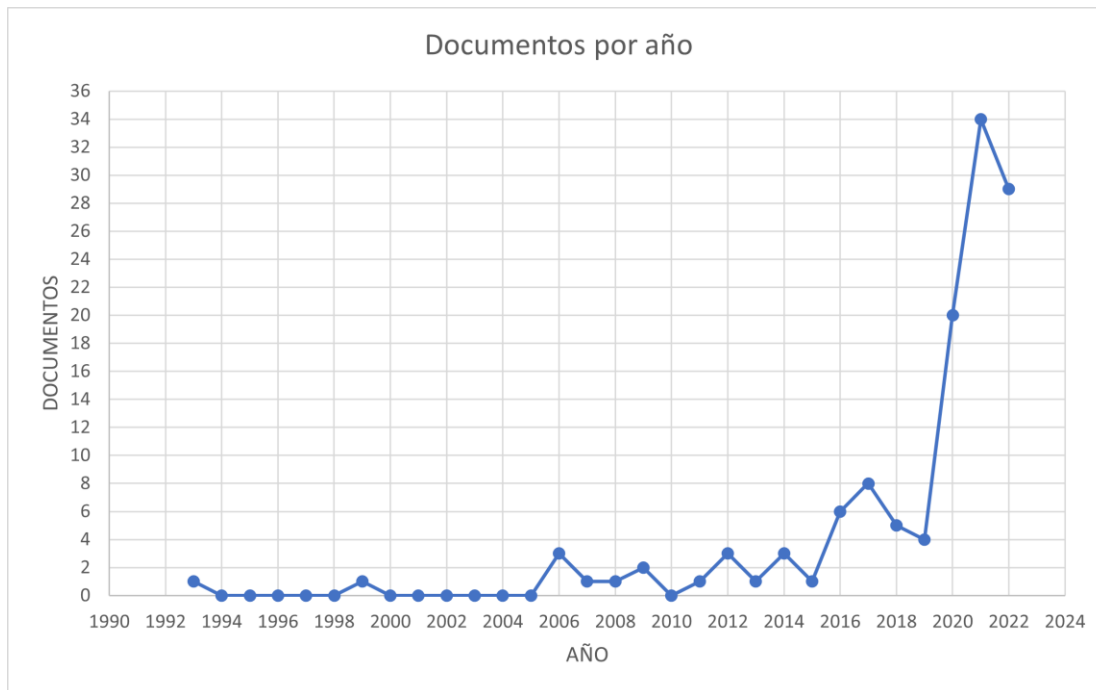
A partir de esta ecuación se obtiene un total de 41 resultados a los cuales se les vuelve hacer una revisión de uno por uno teniendo en cuenta las mismas consideraciones hechas con la anterior ecuación a la hora de aplicar el filtro y se obtienen 7 artículos.

Para lograr un análisis bibliométrico más detallado de los resultados alcanzados a partir de las dos ecuaciones de búsqueda, se dispone a hacerse este análisis en dos partes, primeramente, se utiliza el Analyze search results que se encuentra disponible en Scopus y posteriormente se utilizará el software VOSviewer.

El Analyze search results es una herramienta que proporciona Scopus en la cual se puede analizar cualquier grupo de resultados de búsqueda, en los que se puede encontrar información útil sobre autores y revistas al pasar del tiempo. Además, brinda un interfaz de gráficos y tablas en los que se puede interactuar de mejor manera a través de cada una de ellas, se pueden ver parámetros como los documentos por país, incluso el tipo de documento, entre otros. Esta herramienta organiza la información de manera apropiada lo que permite interpretarla y procesarla de mejor manera y proporcionar un análisis estadístico de mayor calidad.

Se tomarán los resultados de ambas ecuaciones de búsqueda y se consolidarán con el fin de realizar un solo análisis bibliométrico. Para el Analyze search results no se pueden tomar únicamente las publicaciones seleccionadas después de hacer la revisión uno por uno así que se toma el total de la búsqueda.

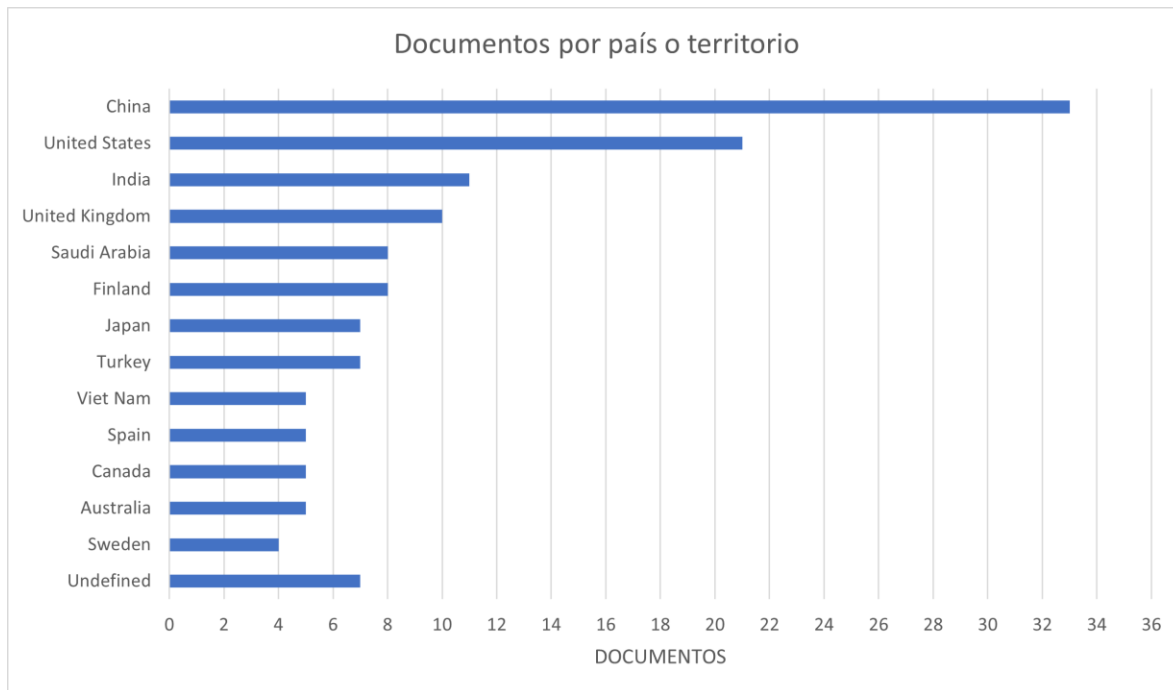
A continuación, se muestra en la figura 1 cómo se comporta la cantidad de publicaciones a lo largo del tiempo para las dos ecuaciones de búsqueda.

**Figura 1***Publicaciones por año*

*Nota.* Adaptado del *Analyse search results* de *Scopus*, 2023.

De la figura 1, se puede concluir que el tema abordado por la presente investigación es relativamente nuevo pues su primer artículo fue publicado en el año 1993 y además de ello hubo muchos años en los que no hubo ni un solo artículo publicado, solo hasta el año 2006 se empieza apreciar una actividad más frecuente de publicaciones por año, con al menos uno por año, pero desde el año 2016 comienza haber un incremento considerable en el número de artículos publicados y para el 2021 llega a una cifra de 34 documentos publicados. Esto nos permite inferir la importancia que ha llegado a tener en los últimos años los temas relacionados con este proyecto.

En la figura 2 se puede observar la cantidad de publicaciones por países o territorios de las dos ecuaciones de búsqueda.

**Figura 2***Publicaciones por país o territorio*

Nota. Adaptado del *Analyse search results* de *Scopus*, 2023.

De acuerdo con la figura 2 se puede afirmar que la mayor parte de investigaciones relacionadas con el tema de este proyecto están reunidas en Estados Unidos y China. Es de resaltar que hay un número relevante de investigaciones a las cuales no está definido el país al cual están enlazadas. Es importante mencionar que no era posible añadir países en la figura 2 a los cuales solamente se les atribuía dos o una sola investigación. Tomando los países que se pueden apreciar en la figura 2 e incluyendo los que no fue posible añadir, se evidencian dos países pertenecientes a Latinoamérica, con lo cual podemos concluir la falta de investigación que se presenta en esta parte del mundo con respecto al tema tratado en este proyecto.

VOSviewer es una herramienta de software usada para realizar visualizaciones de redes bibliométricas tales como publicaciones individuales, revistas o investigadores que son construidas a través de citas, co-citas, acoplamiento bibliográfico o relaciones de coautoría. Esta

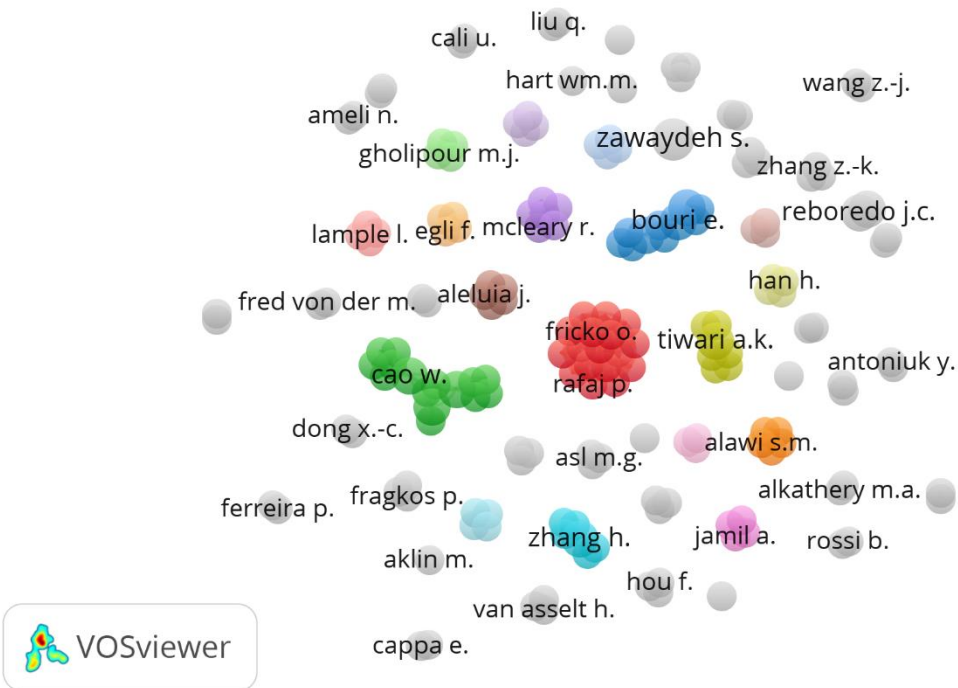
herramienta también cuenta con el servicio de minería de texto del cual se puede revisar redes de coocurrencia extraídas de un volumen de literatura científica.

El análisis que se realizó en VOSviewer se llevó a cabo en dos partes, inicialmente para la primera ecuación de búsqueda y seguidamente para la segunda ecuación ya que para esta herramienta no es posible realizar el análisis para dos ecuaciones puesto que el software verifica que el archivo de datos no esté corrupto. A diferencia del Analyse search results para el VOSviewer si es posible realizar el análisis solamente para los documentos seleccionados que son los que se escogieron luego de ejecutar la revisión uno por uno, a pesar de ello también se usarán todos los resultados proporcionados por la búsqueda para este análisis de VOSviewer.

La figura 3 que expone la cantidad de publicaciones por autor y a su vez indica las relaciones de coautoría que se presentan entre ellos para la primera ecuación de búsqueda, de allí se puede destacar que Zawaydeh S. es el autor que más tiene publicaciones, seguido por Reboredo J.C y Ugolini A. que cuentan con la misma cantidad. También se puede concluir que hay dos grandes conjuntos de nodos que están estrechamente conectados, lo que indica una gran red de coautoría entre ellos, refiriéndonos en concreto al conjunto de color rojo y el conjunto de color verde, mientras tanto se encuentran muchos nodos sueltos con pocas o nada de conexiones.

**Figura 3**

*Cantidad de publicaciones por autor y coautoría entre ellos, para la primera ecuación de búsqueda*

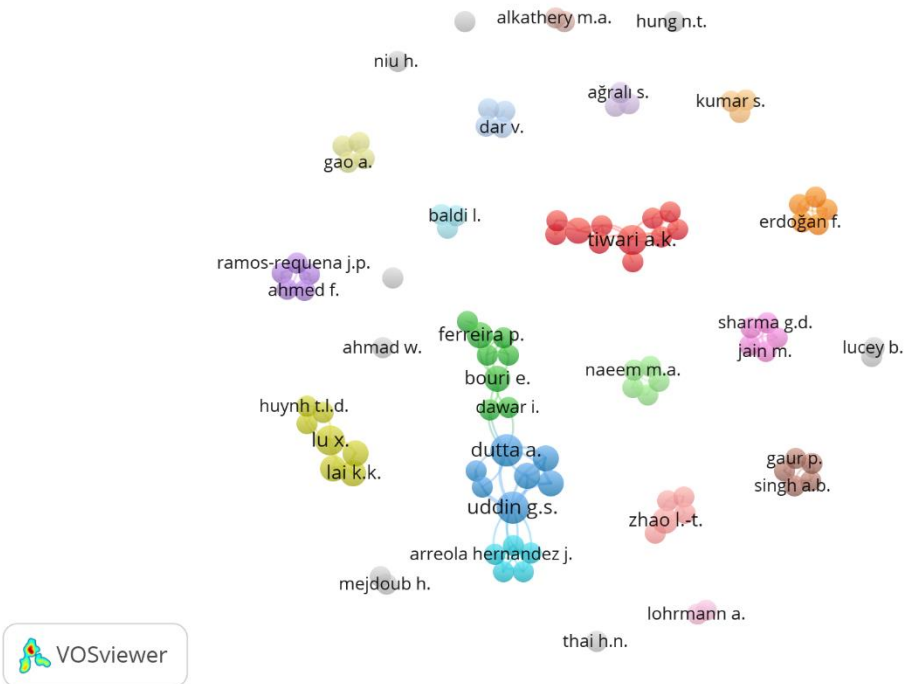


*Nota.* Adaptado del software *VOSviewer*, 2023.

En la figura 4 se observa la cantidad de publicaciones por autor y al mismo tiempo demuestra las relaciones de coautoría que se presentan entre ellos para la segunda ecuación de búsqueda. A diferencia de la anterior ecuación de búsqueda se puede evidenciar una conexión interesante entre 3 nodos, esto se refiere a los enlaces entre los conjuntos de nodos de color verde con azul y a su vez azul con celeste, lo cual nos indica una conexión de coautoría entre ellos, y también es evidente que hay muchos nodos con pocas o nada de conexiones, en otras palabras, que tienen pocas o nada relaciones de coautoría. Acerca de la cantidad de publicaciones por autor solo resalta del resto la cantidad realizada por Dutta A. y Uddin G.S. que cuentan con 4 publicaciones.

**Figura 4**

*Cantidad de publicaciones por autor y coautoría entre ellos, para la segunda ecuación de búsqueda*



*Nota.* Adaptado del software *VOSviewer*, 2023.

Para el análisis de la cantidad de publicaciones por autor y coautoría entre ellos se puede concluir que entre las dos ecuaciones si comparten algunos autores que son Ferreira P., Lu X. o Uddin G.S., sin embargo, no comparten la misma cantidad de publicaciones dichos autores, a su vez se puede apreciar que tampoco comparten las mismas relaciones o coautoría entre ellos.

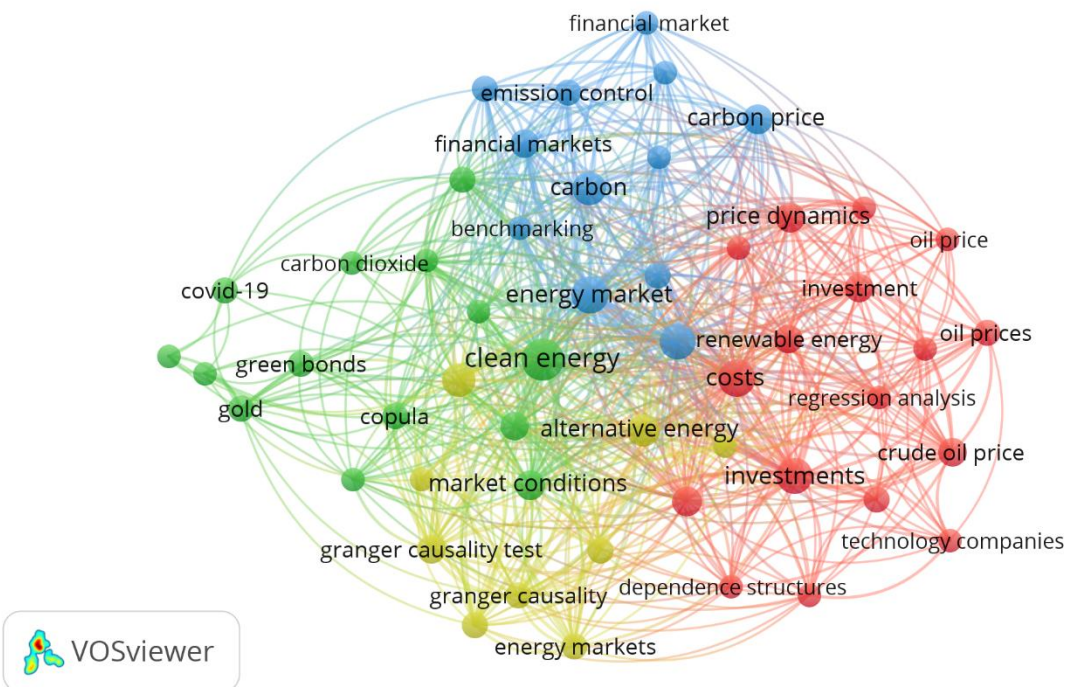
La figura 5 que se muestra seguidamente, expone las palabras clave que mayor reincidencia tienen en las publicaciones para la primera ecuación de búsqueda, además de las conexiones que hay entre ellas, es decir, que tantas veces aparece una palabra unida con otras. De la figura 5 se puede afirmar que hay al menos siete palabras con mayor ocurrencia dentro de nuestra búsqueda, entre ellas se pueden destacar las relacionadas con inversiones, combustibles fósiles, desarrollo



ecuación de búsqueda. Se manifiesta una conexión muy interesante entre mercado financiero y control de emisión, así como también la conexión presentada entre condiciones de mercado y energía alternativa.

### Figura 6

*Coocurrencia de palabras clave, para la segunda ecuación de búsqueda*



*Nota.* Adaptado del software VOSviewer, 2023.

En el análisis de coocurrencia de palabras clave se logra concluir que entre las dos ecuaciones de búsqueda comparten algunas palabras claves como por ejemplo inversiones, mercado de energía y energía alternativa, no obstante, se evidencia que hay palabras clave que no están en la otra ecuación de búsqueda y que consiguen complementar la investigación.

### 3.2 Análisis preliminar de la literatura

Por primera vez, el estudio realizado por S. Kumar et al, en 2011 presentó la manera de involucrar la relación que hay entre el mercado de energía limpia a través de 3 índices de energía

limpia y el mercado del petróleo, ya que además de estas dos variables añadieron el índice de los precios de las acciones tecnológicas (PSE), los precios de los derechos de emisión de carbono y las tasas de interés a corto plazo, realizando esta relación mediante un modelo de auto regresión vectorial de orden  $p$ , lo cual mostró una relación positiva entre las variables en un periodo de 3 años (2005-2008). Por tanto, este estudio nos muestra un primer acercamiento a partir de un modelo econofísico de cómo pueden estar relacionadas estas dos variables además de cómo pueden influir otras variables sobre ellas.

Hay estudios en los que en ocasiones no es necesario poner como variables principales los precios de energía limpia y del petróleo para hallar una relación entre ellos, como es el caso de Lee et al, en 2013 quienes pretendían investigar la información anormal en el Índice de Energía Limpia de WilderHill (ECO) y el Índice de Tecnología Arca de NYSE (PSE) a través del uso de un modelo de intensidad de salto condicional autorregresivo en la Distribución de Error Generalizado Skew (ARJI-SGED). También se puede añadir el caso de L. Baldi et al, en 2013 quienes buscaban analizar el impacto de las tendencias de los precios de materiales de tierras raras (REM) en seis índices de energía limpia, al igual que Reboredo y Ugolini unos años después en 2020 a través del modelo autorregresivo de vector de conmutación de Markov.

La cantidad de modelos usados puede cambiar para cada estudio, un trabajo reciente hecho por P. Ferreira y C. Loure, en 2020 utiliza dos modelos, los cuales son el análisis de fluctuación sin tendencia (DFA) y el análisis de correlación cruzada sin tendencia (DCCA), el caso de X. Zhao (2020) que usa un solo modelo VAR estructural para estimar los impactos de los choques del precio del petróleo sobre los rendimientos de las acciones de las empresas de energía limpia, mientras que W. Hamad (2017) usa 3 modelos en su investigación, GARCH-BEKK, correlaciones

condicionales constantes (CCC) y correlaciones condicionales dinámicas (DCC) para confirmar las estimaciones de desbordamiento direccional.

Algunas investigaciones usaron métodos que podrían considerarse similares, por un lado Zhang et al (2020), a partir del método de regresiones cuantiles sobre cuantiles, el cual puede rastrear el grado variable de estructura de dependencia de la cola y también facilita el examen de la relación causal en el primer y segundo momento simultáneamente; al igual que Dawar et al (2020) quienes emplean una regresión cuantílica (QR) que permite descubrir la relación asimétrica entre las variables y además modelar los cuantiles de una variable aleatoria como funciones de las variables observadas.

Otras investigaciones usan los modelos basados en cópulas que resultan muy interesantes para la literatura, tal como la realizada por Reboredo y Ugolini, en 2018 quienes emplean el modelo de cópula de vid, que ofrece flexibilidad de modelado, ya que los modelos marginales y las estructuras de dependencia multivariante se modelan de forma independiente, y también la hecha por Elie et al (2019) en la cual aplican cópulas simples y mixtas lo que permite que la incorporación de varias mezclas de cópulas permita capturar medidas de dependencia de la cola basadas en asintótica y no paramétricas.

En algunos países se han hecho investigaciones de cómo se relacionan los precios de energía limpia con los precios del petróleo en su mercado de valores, como es el caso de Habiba y Zhang, en 2020 quienes realizaron un estudio en Pakistán el cual obtiene como resultado que existen efectos secundarios negativos y significativos del mercado del petróleo a las acciones del sector de la agricultura, la energía y la maquinaria, además que el desarrollo del mercado de valores motivará a las empresas altamente contaminantes a invertir más en energía renovable y limpia, por

otra parte Gu et al, en 2020 realizan un estudio en China que concluye un derrame significativo de volatilidad bidireccional entre el mercado del carbón de vapor y las acciones de energía limpia.

La investigación realizada por Janda et al. (2022) es relevante para la literatura pues encuentran que los rendimientos anteriores de las empresas de energía renovable de EE. UU han impactado notablemente en los rendimientos actuales de las empresas chinas de energía renovable, esto es bastante interesante pues indica que los rendimientos de los principales índices de referencia de las empresas de energía renovable de EE.UU tienen un poder importante para pronosticar una futura dirección de movimiento de las acciones en el mercado chino.

Después de la reciente pandemia ocasionada por el Covid-19 se hicieron algunos estudios acerca de la relación entre los precios de la energía limpia y los precios del petróleo afectados por distintas crisis, como es el ejemplo de Muhammad et al. (2021) quien reveló que los efectos de transmisión entre estos dos precios aumentan en los periodos de crisis, también un estudio realizado por Ghabri et al. (2021) en el transcurso de la pandemia de Covid-19, mostró como resultado un incremento representativo en los rendimientos de las acciones de energía limpia posteriormente de la gran caída de los precios del petróleo crudo. Más tarde Muhammad et al. (2022) encontraron que la interrelación de la volatilidad entre estas dos variables alcanzó su punto máximo durante la caída del precio del petróleo que empezó en 2014 y duró hasta el 2016, la crisis de la deuda europea del 2010 al 2012 y finalmente la reciente crisis pandémica de Covid-19.

Recientemente se llevó a cabo un estudio que tenía como finalidad indagar la relación que puede haber a largo plazo entre el desarrollo económico y financiero, las energías renovables y no renovables y además el capital humano en 16 países de Latinoamérica, estudio efectuado por Ponce et al. (2021) quienes obtuvieron como resultado que hay presencia de una relación de estabilidad de largo plazo entre el consumo de energías renovables y no renovables, el crecimiento financiero

y el capital humano con el crecimiento económico, se observó que hay una causalidad unidireccional desde el consumo de energías renovables hasta el crecimiento económico y además de ello se relacionan positivamente a largo plazo en los países estudiados.

La anterior investigación nos muestra un primer acercamiento del estudio de las relaciones del mercado de energía renovable con otra variable, sin embargo, para ese estudio esta relación no se realiza entre éste y el mercado de energías no renovables, sino con el crecimiento económico, además esta variable se toma como el consumo de energía renovable y no con los precios transados en bolsa, por tal motivo no se encontraron aportes a la literatura acerca de relaciones entre el precio de energía limpia y el precio del petróleo con variables presentes en Latinoamérica.

#### **4. Planteamiento del problema**

A partir del análisis bibliométrico se puede observar que la cantidad de publicaciones vinculadas con la temática del presente estudio aumenta cada vez más. Se observa un crecimiento relevante la cifra de artículos publicados en los últimos tiempos, esto prueba que ha habido un interés reciente por la comunidad académica por este tema.

Otra característica que se refleja al realizar el análisis bibliométrico es la desigualdad en términos de literatura perteneciente a los mercados de valores de Latinoamérica frente a la literatura de este mismo tema con el resto del mundo, puesto que este suele ser un tema de gran interés para el sector de inversión en el mundo.

La presente investigación pretende hacer un aporte a la literatura de la relación entre precios en el mercado de valores, con el propósito de encontrar la relación existente entre los precios de energía limpia y del petróleo en Colombia, de esta manera proporcionar conocimiento a la literatura de Latinoamérica, además de añadir una variable distinta que represente al mercado de energías renovables. Finalmente, esta investigación muestra un aporte a la metodología, usando

los métodos de análisis de fluctuación sin tendencia y el análisis de correlación cruzada sin tendencia ya que estos se complementan entre sí, con variables distintas a las propuestas en anteriores estudios.

Se espera que los resultados obtenidos en este estudio sean de gran utilidad para los inversionistas, que quieran invertir en el mercado de valores colombiano ya que pueden analizar o llegar a predecir el comportamiento que puede llegar a tener el mercado de energía limpia contemplando las variaciones que se generan en el mercado del petróleo, también conseguiría que tanto Colombia como los países con variables similares puedan contribuir creando políticas de energía limpia que ayuden ya sea a estabilizar el mercado bursátil o a potenciarlo. De igual manera se benefician las investigaciones que quieran hallar relaciones entre mercados ya sea en Latinoamérica o en otra parte del mundo.

## **5. Marco de referencia**

### **5.1 Marco de antecedentes**

En primer lugar, Lagos (2017) estudia la relación entre el índice bursátil de los países con mayor capitalización bursátil en América Latina, Brasil, México, Perú, Colombia y Chile y los principales índices macroeconómicos como el PIB, la tasa de desempleo y la inflación; se usaron series de tiempo en un espacio temporal de 10 años (2006–2016). Para hacer la relación entre estas variables, inicialmente se hace uso del coeficiente de correlación ( $r$ ) para la selección de las dos variables macroeconómicas, posteriormente a este análisis preliminar es necesario probar el orden de integración de cada serie, para ello se usa la prueba Dickey-Fuller Aumentada para detectar una situación de no estacionariedad, después se usa la prueba de cointegración Engle y Granger para analizar si tienen relación de equilibrio en el largo plazo, luego se aplica el modelo de vectores autorregresivos que pueden ser VAR en niveles, VAR en diferencias o VECM, por último se usara

la prueba de causalidad de Granger que busca describir la relación causal entre series de tiempo. En sus resultados, se encuentra evidencia de causalidad en al menos uno de los dos casos en cada uno de los países de estudio, esto muestra que el crecimiento de los mercados de valores en Latinoamérica tiene un posible impacto en la economía real de los países.

La metodología usada en el planteamiento del modelo econométrico para explicar la relación de causalidad entre el índice de mercado y los indicadores económicos es de gran ayuda para esta investigación.

Por otra parte, Blanco (2020) expone un análisis sobre la relación entre crecimiento económico, consumo de energía y emisiones de dióxido de carbono en Colombia para un periodo que abarca desde 1971 al 2014. Para realizar la relación entre esas variables primeramente se procede a evaluar la raíz unitaria aplicando la prueba Dickey-Fuller Aumentada, después se determina si las series son estacionarias a través de las pruebas Kwiatkowski, Phillips, Smichdt y Shin (KPSS), luego identifica la cantidad de rezagos evaluando los criterios Akaike (AIC), Hanna-Quin (HQ), Schwarz (SC) y el Error de predicción final (FPE). Posteriormente realiza el modelo VAR y acto seguido las pruebas de correlación de Portmanteau, se hace el test de Jarque-Bera, se efectúa la prueba de ARCH y finalmente realiza el test de Johansen. También realiza la prueba de causalidad de Granger para conocer si las variables se causan entre sí, y si esto se da, en qué dirección. Para finalizar la evaluación de impulso-respuesta muestra las respuestas de las variables a un choque de desviación estándar. Los resultados muestran que hay una relación positiva entre el consumo de energía hacia el PIB y hacia las emisiones de dióxido de carbono, esto le permite concluir que a largo plazo el crecimiento económico es una posible consecuencia del consumo de energía y este a su vez del cambio climático, al menos para el caso colombiano. También concluye que las políticas energéticas encaminadas a la reducción de gases de efecto invernadero deben

resaltar el uso de fuentes de energía renovable en lugar de disminuir el consumo de energía para así proporcionar una compensación entre consumo de energía y crecimiento económico.

Esta investigación muestra un marco conceptual que ofrece información importante para este proyecto, como el consumo y el uso de la energía, además de presentar el modelo de crecimiento con variable de recursos naturales, que es interesante y pertinente para esta investigación.

Para finalizar Guihur (2016) investiga la relación existente entre la capitalización bursátil y el crecimiento económico en Colombia. Para realizar esta investigación toma los datos en una ventana de tiempo de dieciséis años (2000-2015) los cuales están compuestos por datos trimestrales y constantes al 2005. Inicialmente realiza un análisis gráfico para identificar la naturaleza de las distribuciones de las series de tiempo, después genera los correlogramas de cada variable y en seguida lleva a cabo la prueba de Dickey-Fuller Aumentada, seguido de ello procede a realizar el Método de Mínimos Cuadrados Ordinarios, calcula el estadístico de Jarque-Bera y usa el método ARCH, finalmente utiliza la prueba de causalidad de Granger.

Los resultados alcanzados dejan ver que hay una relación positiva entre la profundización bursátil y el crecimiento económico, con una causalidad bidireccional, asimismo llega a la conclusión que en Colombia es importante fomentar el progreso del mercado de valores, generando así mejoras en la economía.

El marco teórico planteado en esta investigación es valioso para la realización de este proyecto. La información suministrada es pretendida por esta investigación. Las pruebas realizadas pueden ser de utilidad para el objetivo de esta investigación.

## **5.2 Marco teórico.**

### ***5.2.1 Mercado financiero***

Es el conjunto de instrumentos usados para la transferencia de recursos entre los agentes económicos. A través de este, se ejecutan transacciones con títulos a largo, corto y mediano plazo, que son destinados generalmente para financiar el capital fijo o de trabajo de las empresas, el gobierno y sus entes descentralizados.

El mercado financiero instauro los mecanismos que favorecen el contacto entre los participantes en la negociación tales como empresas, gobierno, instituciones financieras e inversionistas, también se encarga de establecer los precios en servicio de su oferta y demanda para los productos financieros y además disminuye los costos de intermediación, lo que aporta un mayor tránsito de los productos.

### ***5.2.2 Energía renovable***

La energía que se adquiere de manera natural y que tiene la capacidad de restablecerse continuamente por su misma naturalidad, que aparte de ello son potencialmente inagotables, por la gran cantidad de energía que presentan.

Las tecnologías de energía renovable transforman estas fuentes naturales de energía en modos aprovechables de energía como los combustibles, la electricidad y el calor

Las fuentes de energía renovable que existen en el entorno son el sol, agua, viento, biomasa y geotérmica. Las energías renovables se pueden clasificar teniendo en cuenta el nivel de progreso tecnológico y también con respecto a su grado de inclusión en la matriz energética de los países, de esta manera se clasificarían como energías renovables convencionales y no convencionales. Como energías renovables convencionales se toman por ejemplo a las grandes centrales

hidroeléctricas y como no convencionales se consideran a las solares fotovoltaicas, geotérmicas, biomasa, pequeñas hidroeléctricas, generadoras eólicas, mareomotrices y las solares térmicas.

### ***5.2.3 Energía hidroeléctrica***

Es electricidad producida a partir del aprovechamiento de la energía que se causa por el movimiento del agua. La energía provocada por las corrientes de agua que provienen generalmente de montañas y colinas, que a su paso crean ríos y arroyos que al final terminan desembocando en el océano.

El agua acumulada en una presa o en un embalse, desciende por una tubería la cual al final se le pone una turbina que empieza a girar al caer el agua, este giro ocasiona que se ponga en marcha el generador eléctrico consiguiendo de esta manera la electricidad. Este proceso es realizado en las centrales hidroeléctricas.

Una virtud de la generación de electricidad mediante la energía hidroeléctrica es que es previsible y además de ello puede ser constante, al contrario que las otras energías renovables.

### ***5.2.4 Mercado de energía***

Es el instrumento que permite la venta, compra y comercialización de la energía en sus diferentes maneras. La energía se logra transar como energía primaria (carbón, petróleo, etc) o como energía final (calor distributivo, electricidad). Los precios son puestos a través de la ley de demanda y de la oferta, y existen muchas maneras distintas de negociación.

Se pueden percibir dos tipos de mercado, uno de ellos es el mercado mayorista en los que se negocian grandes cantidades de energía que además pueden presentar mercados no organizados y mercados organizados y también están el tipo de mercado minorista en el cual se negocian pocas cantidades de energía que son proporcionadas a los consumidores finales.

### ***5.2.5 Mercado de energía en Colombia***

En Colombia el mercado mayorista de energía es un mercado competitivo que esta originado mediante la reforma eléctrica (leyes 142 y 143 de 1994) en el que se hacen participes los distribuidores, generadores, comercializadores, transmisores y grandes consumidores de electricidad o usuarios que no están regulados. Quien determina las reglas aplicables a este mercado es el ente regulador CREG.

El mercado se encuentra dividido en dos secciones, la bolsa de energía en la que se manejan transacciones a corto plazo y el mercado de contratos bilaterales los cuales se realizan a largo plazo. La energía puede estar transada en bolsa o a partir de contratos bilaterales con distintos comercializadores, generadores, usuarios no regulados o directamente con los grandes consumidores.

### ***5.2.6 Petróleo***

Es un recurso natural no renovable, el cual está considerado como el energético que más ha tenido repercusión en la historia del ser humano, debido a que proporciona el mayor porcentaje de la energía total que se usa en el mundo.

Puede encontrarse en estado líquido o gaseoso. El estado líquido del petróleo puede cambiar desde liviano hasta pesado y extrapesado, a partir de esta variación se somete su clasificación en grados API (Instituto Americano del Petróleo). En cuanto más grados API sea el petróleo, menos refinación se necesita para alcanzar de él los productos “blancos” que son del petróleo sus productos más costosos, como por ejemplo la gasolina.

### ***5.2.7 Mercado del petróleo***

El desempeño del mercado de petróleo se ha procurado formalizar usando distintos modelos que intentan justificar su comportamiento. Por una parte, se encuentran los que se apoyan

en las propiedades características de la oferta mientras que otros se sostienen en las características de la demanda.

Un aspecto particular que además es bastante sobresaliente del mercado del petróleo trata acerca de la manera en que se define la creación de los precios internacionales. Existen tres precios de guía, uno de ellos llamado benchmark del cual se rigen las demás variedades de crudo según su contenido de azufre y sus propiedades de densidad, también de acuerdo con su coste de transporte y otros componentes que se añaden en el precio de venta. Los tres precios son, el precio Brent, el crudo West Texas Intermediate y el precio de Dubái.

### ***5.2.8 Petróleo Brent***

Es un tipo de petróleo ligero y dulce, óptimo para realizar la producción de gasolinas. Su explotación ocurrió a partir del 1976 pero fue descubierto en 1971, es procedente del Mar del Norte al oeste de Europa donde fue descubierto por Shell.

El barril de petróleo Brent, sirve de referencia para Colombia desde el 2011 debido a una mejora en los precios internacionales y un alza en la cotización de crudos más pesados en la época.

### ***5.2.9 Mercados Eficientes***

La teoría de mercados eficientes se afianza en la década del setenta a partir de un paper publicado por Eugene Fama, quien sosteniéndose en estudios anteriores de Louis Bachelier y también de Markowitz, muestra la siguiente definición “es un mercado eficiente aquel en el cual los precios reflejan toda la información disponible” (Fama, 1970).

Mas tarde Shleifer en el 2000 describe que la teoría de mercados eficientes está basada en tres principios primordiales de la conducta de los inversores.

El primero se sustenta en la racionalidad de los inversores. Esto representa como los inversores mantienen una regularidad en cuanto a los criterios técnicos y métodos usados para

evaluar activos, lo que repercutiría que todos los inversores valoren de la misma manera los instrumentos financieros.

Para el segundo principio comprende las desviaciones independientes de la racionalidad. Esto quiere decir que hay escenarios en los que se toman decisiones que no son muy racionales, puesto que pudiese haber errores de interpretación o también que no se obtiene una información muy precisa y clara, sin embargo, la suma de todas las acciones al ser acciones aleatorias se equilibraría entre sí.

En tercer lugar, las acciones generadas por los inversores irracionales terminan ocasionando el efecto llamado “arbitraje”. Sharpe y Alexander, en 1990 pudieron definir el arbitraje como “la compra y venta simultanea de esencialmente el mismo instrumento financiero en dos mercados diferentes a un precio rentable”.

Para mostrar las diferentes maneras sobre las cuales se evidencia la información, se emplean ciertos grados de eficiencia de mercados. De nuevo Fama, en 1970 es quien analiza las 3 formas acorde a modelos matemáticos.

La forma débil de eficiencia de mercado, como primer nivel expone que la información pasada tal como datos de ganancia o movimientos de precio ya se pueden evidenciar en el precio actual de la acción. Mediante un estudio empírico Malikei (1973) probó que al observar los precios pasados y no poseer información útil, no serviría para crear un portafolio de valores.

En la forma semi-fuerte, los precios muestran todo tipo de información que se encuentre disponible para el público general y no solo la información histórica. Es decir, para este nivel se confirma que los precios son susceptibles a cambios producidos por noticias.

Para la forma fuerte de mercado eficiente, los precios manifiestan toda la información obtenida ya sea pública como privada. En consecuencia, no habrá manera de producir retornos superiores a los del mercado.

### **5.2.10 Mínimos Cuadrados Ordinarios**

El método de mínimos cuadrados trata acerca de minimizar la suma de los cuadrados de las distancias verticales, manteniendo como residuo la diferencia entre los datos observados y los valores del modelo (Hanke y Wichern, 2006).

Se puede definir un modelo lineal como una relación lineal entre una o más variables explicativas y una variable dependiente y se puede escribir de la siguiente manera:

$$y_i = \beta_1 + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_k x_{ki} + u_i, \quad i = 1, \dots, n$$

El método de mínimos cuadrados es un procedimiento estadístico para lograr apreciaciones de los parámetros desconocidos como  $\beta_1, \dots, \beta_k$  con base en un conjunto de inspección sobre las variables  $Y, X_2, \dots, X_k$ .

### **5.2.11 Prueba de Dickey Fuller Aumentada.**

La prueba Dickey-Fuller Aumentada se puede emplear para un conjunto más extenso y para series de tiempo más complicadas que lo que se puede utilizar en una prueba Dickey-Fuller.

Para demostrar la hipótesis nula de un suceso con raíz constante y unitaria ( $H_0: y_t = \delta + y_{t-1} + \varepsilon_t$ ) frente a la hipótesis contraria en el que el desarrollo que genera los datos es un proceso estacionario en torno de una tendencia ( $H_A: Y_t = \delta + \beta t + \phi_1 y_{t-1} + \varepsilon_t$ ) se puede apreciar el siguiente modelo.

$$\Delta y_t = \delta + \gamma y_{t-1} + \beta_1 t + \sum_{i=2}^p \beta_i \Delta y_{t-i+1} + \varepsilon_t$$

De esta manera, cuando se establece el tipo de hipótesis nula y alterna que se van a examinar, se debe resolver el número óptimo de rezagos con el que se llevara a cabo el trabajo y al final se valora si se evalúa la prontitud y la veracidad de la hipótesis nula.

#### **5.2.12 Proceso Estocástico**

Un proceso estocástico es un conjunto de variables aleatorias ordenadas  $\{X_t, \text{con } t \in T\}$  teniendo en cuenta el subíndice  $t$  que normalmente se suele definir con el tiempo.

Por consiguiente, para cada momento  $t$  se obtendrá una variable aleatoria diferente determinada por  $X_t$ , de esta manera un proceso estocástico puede entenderse como una secuencia de variables aleatorias que muestran propiedades que pueden cambiar con el paso del tiempo.

#### **5.2.13 Proceso Estocástico Estacionario**

Un proceso estocástico estacionario se representa a partir de que su distribución de probabilidad cambia de manera más o menos constante durante cierta etapa de tiempo, admitiendo valores que se encuentran en un rango limitado. Por medio de esta información es posible llevar a cabo modelos que pretendan pronosticar la variable.

También se dice que un proceso estocástico es estacionario si su varianza y su media son invariables en el tiempo y si el valor de la covarianza entre dos etapas está sujeto únicamente del residuo entre estos dos ciclos de tiempo y no del tiempo en que se ha medido la covarianza.

#### **5.2.14 Proceso Estocástico no Estacionario**

Un proceso estocástico no estacionario dicese del cual su distribución de probabilidad cambia de manera no constante, es decir que una serie temporal actúe de manera absolutamente caótica o aleatorio.

Para que un proceso sea no estacionario está sujeto a que la esperanza incondicional de ciertos de sus elementos sea distinta de la de otros. Si un proceso no estacionario se puede

modelizar de alguna manera sencilla, en tal caso es probable explicar su estructura probabilística completa mediante una única ejecución finita del mismo.

### 5.2.15 *Análisis de fluctuación sin tendencia (DFA)*

Considera el proceder de series de tiempo individuales con el fin de explicar una correlación de largo alcance que se encuentran en procesos no estacionarios, a su vez se define como una manera de examinar el nivel de eficiencia de los mercados financieros. El análisis de fluctuación sin tendencia asimismo puede entenderse como un método conveniente para explorar la correlación de corto y largo alcance en sistemas no estacionarios y estacionarios.

El modelo usado para el análisis de fluctuación sin tendencia en el siguiente.

$$F_{(n)} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (x_t - \tilde{x}_t)^2}$$

Donde, n es el tamaño de la ventana,  $\tilde{x}_t$  es la coordenada y del segmento de línea recta en cada ventana, y finalmente F(n) es la suma acumulada desplazando la media global de la serie.

$$x_t = \sum_{i=1}^t (x_i - \langle x \rangle)$$

### 5.2.16 *Análisis de correlación cruzada sin tendencia (DCCA)*

Se emplea para examinar la conducta entre series temporales, en otras palabras, su correlación cruzada de largo alcance. El DCCA también tiene la capacidad de ser usado en series de tiempo no estacionarias.

El método DCCA se sustenta en la eliminación de tendencia local en cada una de las dos señales, el método resta localmente un polinomio lineal de la señal original para conseguir una señal localmente estacionaria.

Para empezar con el modelo del DCCA, primero hay que calcular la covarianza de los residuos dada por.

$$f_{DCCA}^2(n) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=i}^{i+n} (x_k - \tilde{x}_k) (y_k - \tilde{y}_k)$$

El cual es usado para hallar la covarianza sin tendencia dada por.

$$F_{DCCA}^2(n) = \frac{1}{N-n} \sum_{i=1}^{N-n} f_{DCCA}^2$$

Posteriormente de repetir para todas las cajas de longitud, se logra el exponente DCCA, dado por una ley de potencia. Para calcular el grado de relación entre los pares de series estudiados, se usa

$$\rho_{DCCA} = \frac{F_{DCCA}^2}{F_{DFA\{x\}} F_{DFA\{y\}}}$$

## 6. Metodología

En esta parte se muestran las etapas de la metodología empírica empleada para encontrar la relación entre el comportamiento del mercado de energía limpia y el mercado del petróleo en el mercado de valores.

### 6.1 Etapa I: Datos.

Inicialmente para analizar el precio de energía limpia de Colombia se toma el mercado energético como variable, se observó que para Colombia la energía producida en su mayoría es energía limpia, teniendo un porcentaje de 68.3% de participación solamente en energía hidráulica según los datos administrados por ACOGEN (Asociación Colombiana de Generación de Energía Eléctrica). Con base en ello se dispone de los precios diarios del mercado de energía en Colombia durante un lapso que comprende desde el 01 enero de 2014 hasta el 31 diciembre del 2023, lo que sería un rango de 10 años. Los datos de esta variable se obtienen de XM quienes son los encargados

de administrar el mercado de energía mayorista en Colombia. Para el análisis y toma de datos se llevará a cabo con el dólar como moneda, y para esta variable la plataforma suministra los precios de lunes a domingo.

Para el mercado del petróleo se usarán los precios diarios del petróleo Brent, puesto que es el petróleo que Colombia toma como referencia para realizar sus negociaciones. Para esta variable de igual manera se tomará el mismo rango de tiempo y los datos también se efectuarán a través del dólar como moneda, los cuales se obtienen de la plataforma *Investing*, sin embargo, esta plataforma proporciona los precios de lunes a viernes, de tal manera que se deberán agregar los días sábado y domingo para que sean la misma cantidad de datos que la anterior variable, esta misma proporción nos permitirá que las variables analizadas al tener la equivalencia en datos, se obtenga una mejor interpretación de las variables.

Asimismo, se realizará un análisis estadístico individual de las variables usadas en la investigación. Para este respectivo análisis se emplearán medidas esenciales tales como máximo, mínimo, desviación estándar, media aritmética, asimetría y curtosis. Finalmente, cuando se han realizado las pruebas estadísticas principales, se dispone a verificar la estacionariedad de los datos.

## **6.2 Etapa II: Test Estacionariedad.**

Es posible comprobar la estacionariedad de un conjunto de datos analizando la estacionariedad de los cambios o diferencias de ese dato. Esto se conoce como “diferenciación” y es una técnica comúnmente utilizada en análisis de series temporales.

Al diferenciar un conjunto de datos, se calcula la diferencia entre cada valor consecutivo. Esto puede ayudar a eliminar tendencias y estacionalidades en los datos, lo que puede hacer que los datos sean más estacionarios.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que la diferenciación no siempre garantiza la estacionariedad. Es posible que los datos diferenciados aún tengan patrones o tendencias que no sean estacionarios.

Para comprobar la estacionariedad de los datos diferenciados, se pueden utilizar pruebas estadísticas como la prueba de Dickey-Fuller o la prueba de KPSS. Estas pruebas pueden ayudar a determinar si los datos diferenciados son estacionarios o no.

Con el objetivo de conocer la estacionariedad de los datos, se procede a ejecutar la prueba de Dickey Fuller Aumentada (DFA) sobre los datos de las variables contemplados en la anterior etapa.

### **6.3 Etapa III: Análisis de correlación con el método de análisis de fluctuación sin tendencia (DFA)**

A criterio del autor, estos métodos resultan especialmente convenientes para alcanzar los objetivos del proyecto, ya que ofrecen una perspectiva robusta y versátil. La elección de estas herramientas metodológicas se basa en sus capacidades para identificar patrones dinámicos y correlaciones estructurales en series temporales complejas, especialmente en contextos donde las relaciones no son evidentes a simple vista.

Estas metodologías ofrecen una perspectiva robusta y versátil, ya que no solo permiten caracterizar las propiedades intrínsecas de las series temporales, sino también explorar relaciones dinámicas que aportan valor al análisis de fenómenos económicos y energéticos complejos.

En esta etapa se expone la manera en que se desarrolla el análisis de fluctuación de tendencia, desglosando las etapas que componen a la ecuación final de este análisis.

Utilizando la metodología planteada por Ferreira y Loures (2020) se propone usar la siguiente ecuación.

$$F_{(n)} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (X_t - \tilde{X}_t)^2}$$

Donde N es el número de muestras y n es el tamaño de la ventana, la cual se refiere a un rango de una cantidad de muestras que agrupadas completan el total de las muestras. Para poder obtener el primer factor que sería  $X_t$  se debe sacar la media de los datos representada por  $\langle x \rangle$  y posterior a ello realizar la suma acumulada de todos los datos desplazando la media global de la serie que se ve reflejado en la siguiente ecuación.

$$X_t = \sum_{1=1}^t (x_t - \langle x \rangle)$$

Después para calcular el siguiente factor definido por  $\tilde{X}_t$  que se denomina como la coordenada Y del segmento de línea recta en cada ventana, primero se deben llevar a cabo mínimos cuadrados para hallar los valores de pendiente y ordenada de la recta para cada ventana y siguiente a ello calcular la coordenada Y de nuevo para cada ventana.

Finalmente se debe calcular el  $F_{(n)}$  repitiendo el proceso para cualquier tamaño de ventana y seguido a ello aplicar una regresión logarítmica, es decir emplear logaritmo a los valores obtenidos de  $F_{(n)}$  y luego usar mínimos cuadrados, y de esta manera el valor de la pendiente sería el valor del DFA.

#### **6.4 Etapa IV: Aplicar el método análisis de correlación cruzada sin tendencia (DCCA)**

Para esta fase, continuando con la metodología de Ferreira y Loures (2020), como primer paso para calcular la correlación cruzada sin tendencia se deben al igual que el DFA realizar la integración de la serie de tiempo, en otras palabras, hacer la suma acumulada desplazando la media global de la serie para ambas series de tiempo y posterior a ello llevar a cabo los mínimos

cuadrados ordinarios en los cuales se elimina la tendencia con el objetivo de hallar la covarianza de los residuos que esta dado por la ecuación.

$$f_{DCCA}^2(n) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=i}^{i+n} (X_k - \tilde{X}_k) (Y_k - \tilde{Y}_k)$$

Esta ecuación es usada para luego calcular la covarianza sin tendencia que para este caso viene dada por

$$F_{DCCA}^2(n) = \frac{1}{N-n} \sum_{i=1}^{N-n} f_{DCCA}^2$$

Después de realizar este procedimiento con todas las ventanas de longitud, se obtiene el exponente DCCA, representado por una ley de potencia. Para poder hallar el grado de relación entre las dos series de tiempo examinadas, se utiliza el coeficiente de correlación que se representa de la siguiente manera.

$$\rho_{DCCA}^2(n) = \frac{F_{DCCA}^2}{F_{DFA(x)} - F_{DFA(y)}}$$

Para llevar a cabo el desarrollo de estos modelos, se recibirá la ayuda de software especializado. Específicamente con Python.

## 7. Datos y resultados

### 7.1 Análisis estadístico.

La tabla 1 muestra las principales pruebas estadísticas realizadas para las series de datos del precio de la energía y del precio del petróleo. Se lleva a cabo el análisis estadístico preliminar sobre los precios diarios desde el año 2014 hasta el año 2023.

#### **Tabla 1**

*Análisis estadístico preliminar*

ÍNDICE	PRECIO DE ENERGIA	PRECIO DEL PETROLEO
Media	0.008001749	0.000121709
Mediana	0.00037028	0
Máximo	0.987541853	0.210185934
Mínimo	-0.632288733	-0.24403598
Desviación estándar	0.128443945	0.020942271
Asimetría	0.94206884	-0.403782305
Curtosis	5.063810657	18.49888078

Con base en la tabla 1 se logra concluir que, entre los precios de la energía y los precios del petróleo, el promedio de los cambios en los precios diarios de los precios de la energía es superior a los del precio del petróleo. De acuerdo con la mediana la distribución del precio del petróleo está centrada alrededor de cero, mientras que la del precio de la energía está ligeramente por encima. El cambio en el precio máximo del precio de la energía es mayor que el cambio en el precio máximo del precio del petróleo, mientras que el rendimiento mínimo del precio de la energía es superior al rendimiento mínimo del precio del petróleo, esto indica una mayor amplitud en las variaciones del precio de la energía.

La volatilidad del precio de la energía, medida mediante la desviación estándar, es significativamente mayor a la del precio del petróleo, esto implica que los cambios en los precios de los precios de la energía presentan una mayor dispersión alrededor de su media, lo que sugiere un riesgo o inestabilidad mayor comparado con el precio del petróleo.

La asimetría en los cambios en los precios de los precios de la energía es positiva, lo que indica un sesgo a la derecha; esto significa que los valores tienden a concentrarse en valores más altos que la media. En cambio, la asimetría en el precio del petróleo es negativa, lo cual indica un sesgo a la izquierda, sugiriendo que los datos están más concentrados en valores por debajo de su media.

Ambas series presentan curtosis elevada, lo cual indica que ambas distribuciones son leptocúrticas, esto conlleva la presencia de colas más gruesas en comparación con una distribución normal, por esta razón ambas series tienen una alta concentración de valores alrededor de la media.

## 7.2 Test de raíz unitaria

Conforme a lo dispuesto en la metodología, se procede a realizar la prueba de Dickey Fuller Aumentada (DFA) para comprobar la estacionariedad de los datos. A continuación, en la tabla 2 se exponen los resultados de los precios examinados para la prueba de Dickey Fuller Aumentada.

**Tabla 2**

*Prueba raíz unitaria*

ÍNDICE	PRECIO DE ENERGIA	PRECIO DEL PETROLEO
t-estadístico	-37.37694231	-35.2042215
valor al 5%	-2.86193353	-2.861927
valor al 1%	-3.43150096	-3.431486
probabilístico	0.0001	0.0001

Al analizar la tabla 2, se concluye que tanto para el precio de la energía como para el precio del petróleo se rechaza la hipótesis nula de existencia de una raíz unitaria, ya que los valores del t-estadístico para ambas series son significativamente menores que los valores críticos al cinco por ciento y al uno por ciento. El rechazo de la hipótesis nula de no estacionariedad implica, de acuerdo con la prueba Dickey Fuller Aumentada, que tanto los cambios en los precios de la energía como los cambios en los precios del petróleo son estacionarios.

La estacionariedad de ambas series es crucial para los objetivos del proyecto, ya que ambas series cumplen con los supuestos necesarios para el uso de los modelos de análisis de fluctuación sin tendencia y del análisis de correlación cruzada sin tendencia, los cuales requieren estacionariedad para proporcionar resultados válidos y confiables.

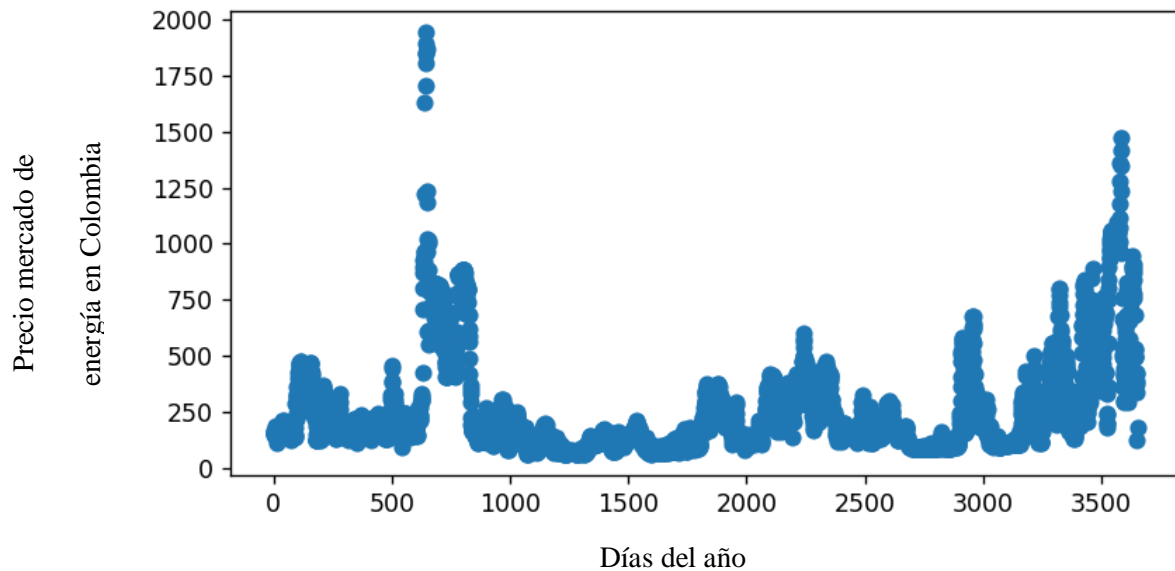
### **7.3 Análisis de correlación con el método de análisis de fluctuación sin tendencia (DFA)**

#### ***7.3.1. Análisis DFA para los precios de la energía***

Para el análisis de correlación por el método DFA, se utilizó el lenguaje de programación Python, empleando un código que representa la ecuación establecida para dicho método. Inicialmente se deben ingresar en el código los datos de las variables que serán sujeto del respectivo análisis. En la figura 7 se puede observar el comportamiento de la serie de datos de los precios del mercado energético en Colombia entre los años 2014 a 2023.

#### **Figura 7**

*Comportamiento serie de datos de los precios del mercado energético en Colombia*



*Nota.* Adaptado del software *Python*, 2024.

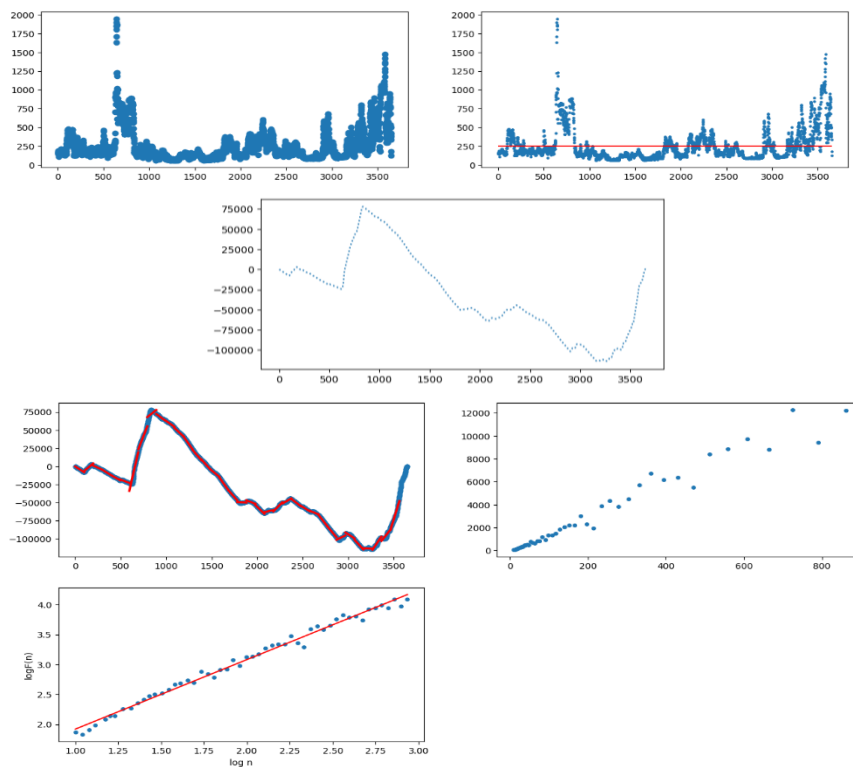
La figura 7 muestra una alta volatilidad en los precios del mercado energético, presentando varios picos significativos con precios que alcanzan valores cercanos a 2000 y otro que llega a los 1500, estos picos podrían denotar eventos específicos, como interrupciones en la oferta de energía, cambios regulatorios, o eventos climáticos extremos que afectaron significativamente los precios, pero también se presentan entre los picos, periodos de relativa calma donde los precios son más bajos y estables, esto podría manifestar periodos de consistencia en el mercado energético, con una oferta y demanda equilibradas y sin sucesos externos relevantes. Aunque hay fluctuaciones significativas, no parece haber una tendencia clara a largo plazo hacia el aumento o disminución de los precios.

Después de ingresar los datos en el código, se ejecutó la ecuación correspondiente al método DFA. El código permitió mostrar gráficamente el proceso paso a paso de lo que se realiza en la ecuación. En la figura 8, se observa este proceso, donde primero se visualiza la serie de datos temporales, ya analizada previamente. A continuación, se calcula la media de los datos, la cual se refleja en el siguiente cuadro con una línea roja. Posteriormente, en otro cuadro, se muestra la

suma acumulada de los datos tras desplazar la media de la serie. En el cuadro siguiente, se observan las posibles rectas de una ventana, y después, en el cuadro posterior, los valores de  $F_{(n)}$  para cada tamaño de ventana. Finalmente, en el cuadro final, se presenta una regresión logarítmica, cuya pendiente de la recta representa el valor del DFA.

**Figura 8**

*Proceso gráfico de la función del DFA para los precios de la energía*

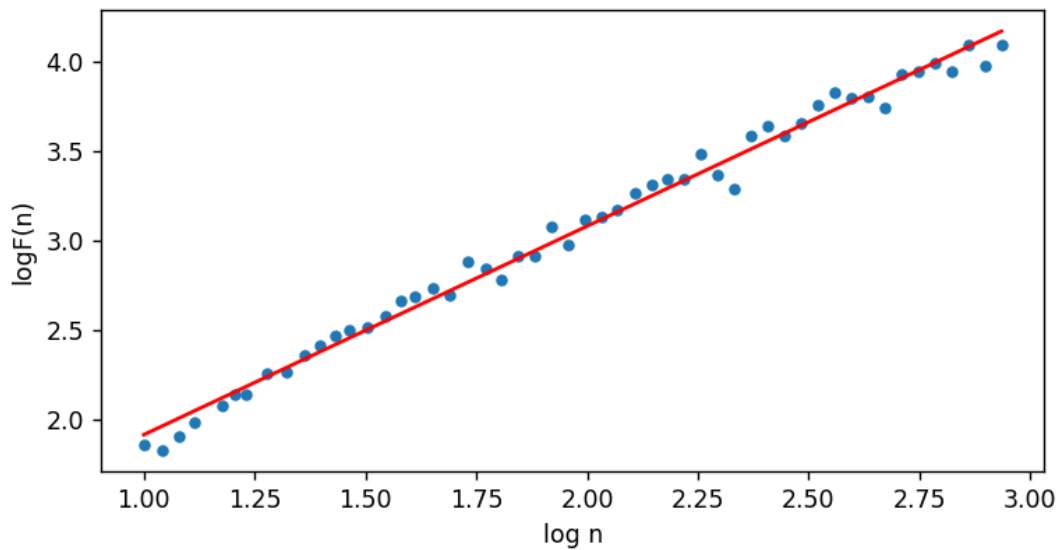


*Nota.* Adaptado del software *Phyton*, 2024.

En la figura 9 podemos apreciar de mejor manera la recta de la regresión lineal hecha, en la que la pendiente de la recta representa el valor del DFA del mercado de la energía en Colombia.

**Figura 9**

*Recta de la regresión lineal para el DFA de los precios de la energía*



*Nota.* Adaptado del software *Phyton*, 2024.

La figura 9 muestra un ajuste bastante preciso de los puntos alrededor de la línea roja, lo que indica que la recta de la regresión lineal es confiable y describe correctamente la escala de las fluctuaciones en la serie temporal de los precios de energía entre los años 2014 y 2023. Esto refuerza, al menos gráficamente, la idea de que los precios de la energía exhiben una débil persistencia en su memoria de largo plazo.

Una vez ejecutado el código, además de mostrarnos las gráficas previamente analizadas, también nos proporciona el valor del DFA. En este caso, para el mercado de la energía en Colombia, con los datos tomados entre 2014 y 2023, el resultado es 1.162. Este valor sugiere que existe una correlación positiva a largo plazo, pero no es una influencia muy fuerte, lo que indica que los cambios en los precios no son completamente aleatorios; los precios tienden a ajustarse a una trayectoria estable con el paso del tiempo.

Para el DFA valores que son cercanos a 1 sugieren que la serie de tiempo tiene una memoria débil, donde los movimientos pasados si tienen algo de influencia sobre los futuros, pero no de manera muy marcada. La débil persistencia observada puede estar vinculada a factores

estructurales o cíclicos del mercado de energía en Colombia. Por ejemplo, variaciones en la oferta y demanda, eventos económicos específicos, cambios en la política energética, o efectos climáticos.

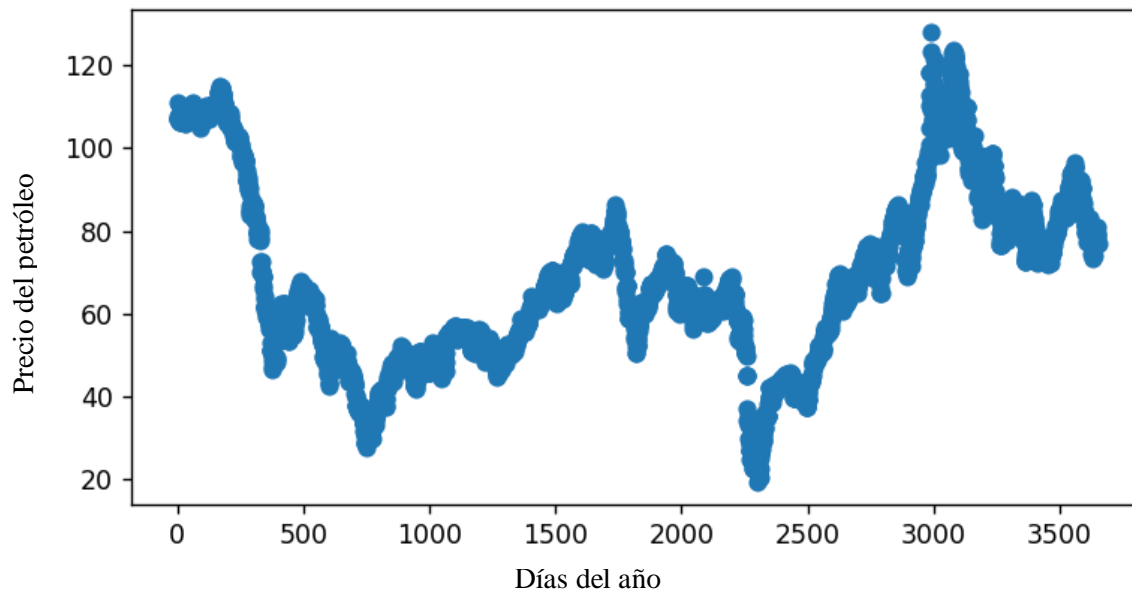
Adicionalmente se puede observar de acuerdo con la figura 9 que hay una consistencia del resultado de DFA, ya que el hecho de que la gráfica muestre una clara relación lineal en la escala log-log respalda la validez del análisis DFA. Esto demuestra que el mercado de energía en Colombia presenta una correlación a largo plazo, aunque no demasiado fuertes, como lo indica el valor de DFA cercano a 1.

### ***7.3.2. Análisis DFA para los precios del petróleo***

En el caso del DFA aplicado a los precios del petróleo, se utilizó también el lenguaje de programación Python, empleando el mismo código que representa la ecuación establecida para dicho método. Inicialmente, se ingresaron en el código los datos de las variables que serían objeto del análisis. En la gráfica 10 se observa el comportamiento de la serie de datos de los precios del petróleo Brent entre los años 2014 y 2023.

### **Figura 10**

*Comportamiento serie de datos de los precios del petróleo Brent*



*Nota.* Adaptado del software *Python*, 2024.

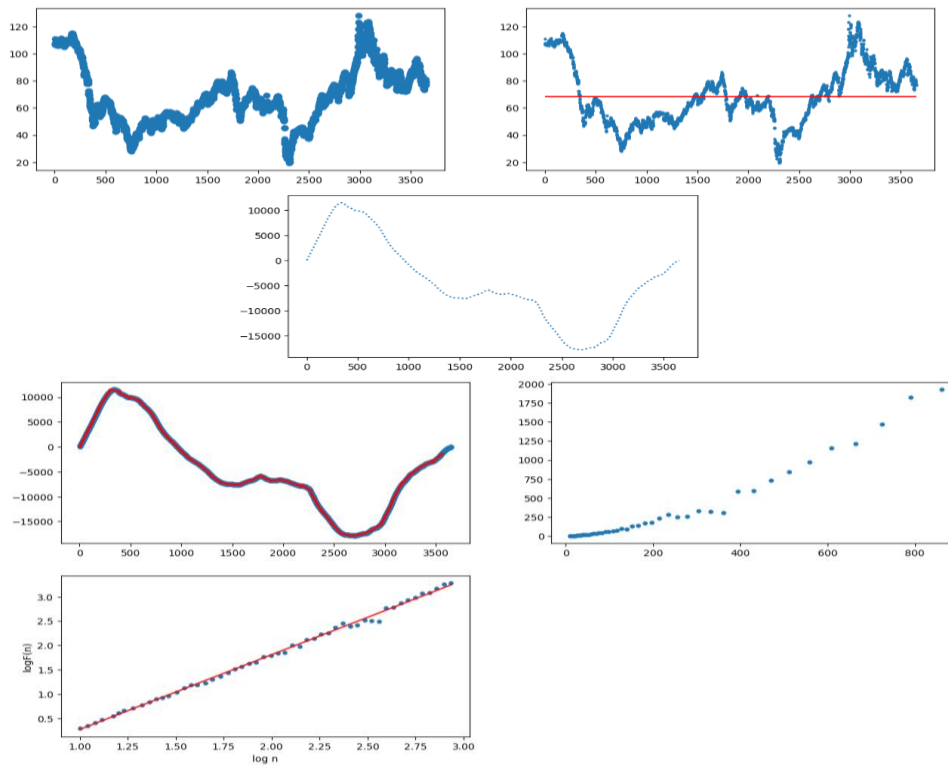
La figura 10 muestra una serie de fluctuaciones significativas en los precios del petróleo a lo largo del tiempo. Se observan varios ciclos de aumento y disminución, con algunas caídas y subidas muy pronunciadas. También se pueden percibir picos o máximos locales que alcanzan valores de 120 y valles o mínimos locales que oscilan entre valores tan bajos como 20, los cuales indican que los precios del petróleo han experimentado periodos de alta volatilidad que podrían estar asociados con eventos específicos, como decisiones de la OPEP (Organización de Países Exportadores de Petróleo), conflictos geopolíticos, cambios en las políticas económicas globales, o con cambios en la oferta y demanda global.

De la misma manera que con el análisis anterior después de ingresar los datos en el código, se ejecutó la ecuación correspondiente al método DFA. El código permitió mostrar gráficamente el proceso paso a paso de lo que se realiza en la ecuación. En la figura 11, se observa este proceso, donde primero se visualiza la serie de datos temporales, ya analizada previamente. A continuación, se calcula la media de los datos, la cual se refleja en el siguiente cuadro con una línea roja.

Posteriormente, en otro cuadro, se muestra la suma acumulada de los datos tras desplazar la media de la serie. En el cuadro siguiente, se observan las posibles rectas de una ventana, y después, en el cuadro posterior, los valores de  $F_{(n)}$  para cada tamaño de ventana. Finalmente, en el cuadro final, se presenta una regresión logarítmica, cuya pendiente de la recta representa el valor del DFA.

**Figura 11**

*Proceso gráfico de la función del DFA para los precios del petróleo Brent*

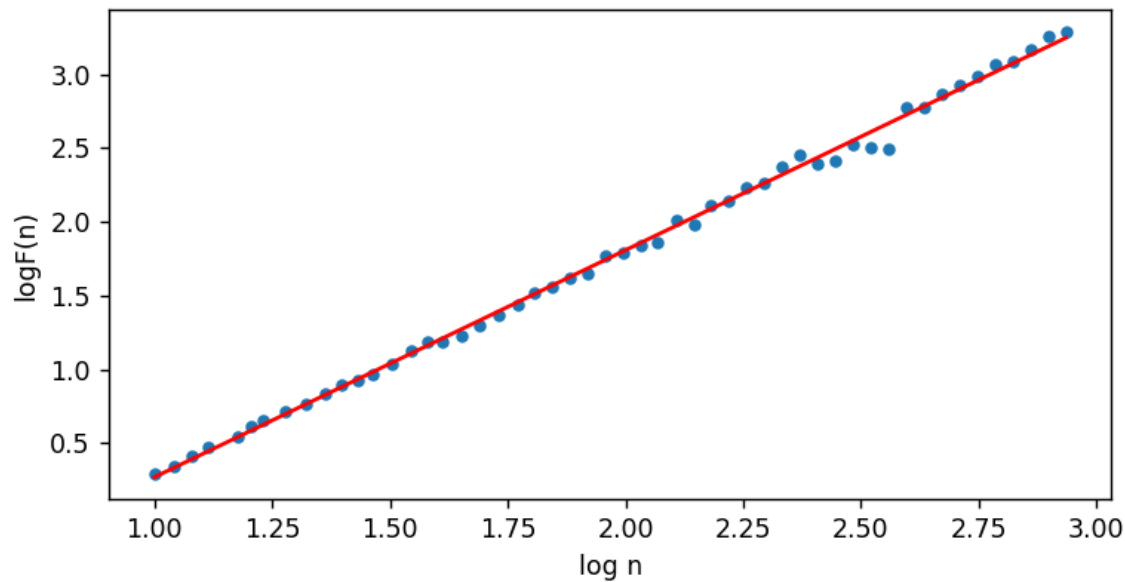


*Nota.* Adaptado del software *Phyton*, 2024.

En la figura 12 podemos apreciar de mejor manera la recta de la regresión lineal hecha, en la que la pendiente de la recta representa el valor del DFA del petróleo Brent.

**Figura 12**

*Recta de la regresión lineal para el DFA de los precios del petróleo Brent*



*Nota.* Adaptado del software *Phyton*, 2024.

En la figura 12, se puede observar que la regresión lineal, representada por la línea roja, muestra un buen ajuste sobre los puntos, lo que indica que el modelo de mínimos cuadrados aplicado para obtener el valor del DFA es adecuado para esta serie de datos. Por otro lado, esta representación gráfica respalda la presencia de una tendencia persistente a largo plazo en los precios del petróleo durante el periodo de 2014 a 2023.

Una vez ejecutado el código, así como en el anterior análisis, además de mostrar las gráficas, también proporciona el valor del DFA. En este caso, para el petróleo Brent, con los datos tomados entre 2014 y 2023, el resultado es 1.537. Este valor indica una fuerte correlación de largo plazo y una tendencia persistente en los precios del petróleo, esto denota que los cambios en los precios no son aleatorios, por el contrario, existe una clara tendencia a largo plazo. Si los precios están subiendo, es probable que continúen subiendo, y si están bajando, es probable que continúen bajando. Esta es una señal de una dinámica de mercado fuertemente dependiente del pasado.

La fuerte persistencia, reflejada en un valor del DFA superior a 1.5, implica que existen factores estructurales o tendencias que influyen en el mercado a lo largo del tiempo. Este resultado puede

reflejar la naturaleza del mercado del petróleo, el cual está frecuentemente afectado por eventos geopolíticos, fluctuaciones económicas globales, cambios en la oferta y demanda energética mundial, innovaciones tecnológicas y decisiones de la OPEP. Estos factores ejercen un impacto duradero en los movimientos futuros de los precios, lo cual es coherente con la realidad de los mercados de materias primas, que son sensibles a choques externos y a expectativas a largo plazo.

Adicionalmente se puede concluir que de acuerdo con la figura 12 que la pendiente de la recta ajustada y el valor del DFA sugiere una fuerte persistencia en los precios del petróleo Brent a lo largo del tiempo, lo que implica que las fluctuaciones tienden a seguirse en la misma dirección durante periodos prolongados.

#### **7.4 Análisis de correlación por el método de análisis de correlación cruzada sin tendencia (DCCA)**

Para el análisis de correlación mediante el método DCCA, se utilizó el lenguaje de programación Python, empleando un código de su biblioteca que permite obtener el resultado de dicho método. Inicialmente, se deben ingresar en el código los datos de las variables que serán objeto del análisis. En este caso, se utilizaron los datos de los precios del mercado de energía en Colombia y, por otro lado, los precios del petróleo Brent.

El resultado obtenido para el DCCA es de  $-0.0238$ , este resultado nos permite concluir que no hay una correlación significativa de largo plazo entre los precios del mercado de energía en Colombia y los precios del petróleo Brent, a su vez el valor negativo sugiere que, aunque la correlación es muy débil, existe una tendencia leve a que las dos variables se muevan en direcciones opuestas. Sin embargo, dado que el valor es casi cero, esta relación es extremadamente débil y posiblemente no significativa.

La falta de correlación significativa puede implicar que los precios del mercado de energía en Colombia no están directamente influenciados por los precios del petróleo Brent de manera consistente a lo largo del tiempo. Esto podría deberse a diferencias en los factores que afectan cada mercado. Por ejemplo, el mercado de energía en Colombia podría depender más de factores locales, como la generación hidroeléctrica, el comportamiento de la demanda interna, o la regulación nacional, mientras que los precios del petróleo Brent están influenciados por factores globales como fluctuaciones en la demanda internacional, conflictos geopolíticos, o la producción de la OPEP.

## **8. Conclusiones**

A través del análisis de fluctuación sin tendencia (DFA) y de correlación cruzada sin tendencia (DCCA), se han identificado comportamientos clave en las series de tiempo correspondientes a los precios del mercado de la energía en Colombia y los precios del petróleo Brent entre los años 2014 a 2023. Los resultados obtenidos permiten comprender mejor la dinámica de estos mercados y su interrelación a largo plazo.

En primer lugar, el análisis de fluctuación sin tendencia (DFA) aplicado a los precios del mercado de la energía en Colombia ha mostrado un resultado de 1.162, lo que sugiere una tendencia débilmente persistente en la serie de tiempo. Esto significa que, aunque los movimientos de precios no son completamente aleatorios, tampoco presentan una correlación fuerte de largo plazo. Existe cierta "memoria" en el comportamiento de los precios, en la que los movimientos pasados influyen ligeramente en los futuros, pero sin una dirección clara. En términos prácticos, esto indica que los precios del mercado de energía en Colombia no siguen un patrón totalmente desordenado, pero tampoco están altamente sujetos a tendencias prolongadas o a efectos duraderos de choques pasados.

Por otro lado, el análisis DFA sobre los precios del petróleo Brent arrojó un resultado de 1.537, lo que revela una fuerte persistencia en esta serie temporal. A diferencia del mercado de la energía en Colombia, los precios del petróleo Brent muestran una mayor memoria de largo plazo, lo que implica que los movimientos de los precios tienden a mantenerse en una misma dirección por períodos más largos. Este comportamiento es característico de mercados fuertemente influenciados por factores estructurales globales, como decisiones de producción de la OPEP, fluctuaciones en la demanda mundial y eventos geopolíticos. La fuerte persistencia observada indica que las fluctuaciones en los precios del Brent no son meramente aleatorias, sino que siguen patrones más definidos que podrían ser objeto de predicción en ciertos contextos.

Finalmente, el análisis de correlación cruzada sin tendencia (DCCA) entre los precios del mercado energético colombiano y los precios del petróleo Brent, con un valor del -0.0238, revela que no existe una correlación significativa entre ambas series en el largo plazo. El valor cercano a cero indica que, a pesar de la interrelación intuitiva entre los dos mercados, los precios del petróleo Brent y del mercado energético colombiano operan de manera relativamente independiente. Esta falta de correlación podría explicarse por la influencia predominante de factores locales en el mercado de energía colombiano, como las políticas energéticas nacionales y la importancia de la generación hidroeléctrica, en contraste con la naturaleza global del mercado del petróleo Brent.

En conjunto, estos resultados sugieren que los precios del mercado de la energía en Colombia y los precios del petróleo Brent no comparten una dependencia directa en el largo plazo. Esto tiene implicaciones importantes para las estrategias de regulación y manejo de riesgos en ambos mercados, ya que los cambios en el precio del petróleo a nivel global no parecen influir de manera significativa y consistente en los precios de la energía en Colombia. Sin embargo, la

persistencia observada en los precios del Brent podría ser un factor por considerar para otros tipos de análisis económicos y de política energética.

Esta investigación describe un importante aporte a la literatura financiera y económica, especialmente en el campo de los mercados de energía y su relación con los precios del petróleo. Aunque el vínculo entre estos dos mercados ha sido analizado en economías más desarrolladas, el estudio específico del mercado energético en Colombia y su relación con los precios del petróleo Brent es todavía escaso. Al emplear herramientas avanzadas como el DFA y el DCCA, esta investigación ofrece una perspectiva novedosa y cuantitativa sobre la dinámica de estos mercados, contribuyendo a una mayor comprensión de los comportamientos de precios y su persistencia a largo plazo. Además, el estudio resalta la importancia de analizar las series temporales de mercados energéticos locales en países emergentes, lo cual es relevante para la literatura enfocada en economías en desarrollo y en la transición energética global.

Este trabajo es útil para inversores interesados en los mercados energéticos, tanto a nivel local como internacional, ya que los resultados específicos de esta investigación les puede permitir tomar decisiones más informadas sobre cómo y dónde diversificar sus portafolios, y así gestionar mejor los riesgos e identificar oportunidades de inversión que no estén directamente relacionadas a las fluctuaciones del petróleo. Igualmente es de utilidad para empresas y reguladores del sector energético en Colombia dado que los resultados conseguidos permiten a estas entidades comprender mejor las causas de las fluctuaciones de precios y cómo están desvinculadas del mercado internacional del petróleo, llevando a cabo una mejor gestión de riesgos y realizando una buena planificación estratégica.

## 9. Recomendaciones

Sería valioso realizar otros estudios que exploren la influencia de otros factores globales y locales sobre el mercado de la energía en Colombia, como por ejemplo en los que se incorporen variables como el precio del gas natural, el comportamiento del mercado del carbón, o el impacto de las políticas energéticas locales y la evolución de las fuentes de energía renovables en Colombia.

Se recomienda extender el estudio de la relación entre el mercado de energía y los precios del petróleo en otros países de Latinoamérica, utilizando el mismo enfoque metodológico basado en el DFA y DCCA, a su vez se puede integrar un comparativo que examine las diferencias entre estos otros mercados con el mercado colombiano.

Finalmente se recomienda desarrollar más estudios sobre el mercado energético en Colombia, usando modelos de series temporales más avanzados, lo cual podría mejorar la capacidad de predicción.

### Referencias bibliográficas

- Alcázar, M. (10 de marzo de 2020). ¿Qué son los mercados energéticos? Mercados energéticos.  
<https://cursomaalor5.blogs.upv.es/2020/03/10/que-son-los-mercados-energeticos/>
- Alonso, J. C. (2010). Tutorial para Pruebas de Raíces Unitarias: Dickey-Fuller Aumentado y Phillips-Perron en EasyReg (No. 009100). Universidad Icesi.
- Ahmad, W. (2017). On the dynamic dependence and investment performance of crude oil and clean energy stocks. *Research in International Business and Finance*, 42, 376-389.  
doi:10.1016/j.ribaf.2017.07.140
- Baldi, L., Peri, M., & Vandone, D. (2014). Clean energy industries and rare earth materials: Economic and financial issues. *Energy Policy*, 66, 53-61. doi:10.1016/j.enpol.2013.10.067
- Blanco, D. M., & Henríquez, S. (2020). RELACIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA, EL CRECIMIENTO ECONÓMICO Y LAS EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO EN COLOMBIA PARA EL PERIODO 1971-2014.
- Campbell, C. J. (2005). The meaning of oil depletion and its consequences doi:10.1144/0060011  
Retrieved from [www.scopus.com](http://www.scopus.com)
- Chirivella González, V. (2015). Hipótesis en el modelo de regresión lineal por Mínimos Cuadrados Ordinarios.
- Dawar, I., Dutta, A., Bouri, E., & Saeed, T. (2021). Crude oil prices and clean energy stock indices: Lagged and asymmetric effects with quantile regression. *Renewable Energy*, 163, 288-299.  
doi:10.1016/j.renene.2020.08.162
- Dutta, A. (2017). Oil price uncertainty and clean energy stock returns: New evidence from crude oil volatility index. *Journal of Cleaner Production*, 164, 1157-1166.  
doi:10.1016/j.jclepro.2017.07.050

Ecopetrol (20 de octubre de 2021) El petróleo y su mundo.

<https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/noticias/resultadobusquedas?busqueda=petroleo%20y%20su%20mundo>

Elie, B., Naji, J., Dutta, A., & Uddin, G. S. (2019). Gold and crude oil as safe-haven assets for clean energy stock indices: Blended copulas approach. *Energy*, 178, 544-553. doi:10.1016/j.energy.2019.04.155

Ellabban, O., Abu-Rub, H., & Blaabjerg, F. (2014). Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 748-764. doi:10.1016/j.rser.2014.07.113

Elsayed, A. H., Nasreen, S., & Tiwari, A. K. (2020). Time-varying co-movements between energy market and global financial markets: Implication for portfolio diversification and hedging strategies. *Energy Economics*, 90 doi:10.1016/j.eneco.2020.104847

Estévez, P. G. (2017). La teoría del mercado eficiente. *Harvard Deusto business review*, (271), 8-14.

Ferreira, P., & Loures, L. C. (2020). An econophysics study of the S&P global clean energy index. *Sustainability (Switzerland)*, 12(2) doi:10.3390/su12020662

Ghabri, Y., Ayadi, A., & Guesmi, K. (2021). Fossil energy and clean energy stock markets under COVID-19 pandemic. *Applied Economics*, 53(43), 4962-4974. doi:10.1080/00036846.2021.1912284

Gu, F., Wang, J., Guo, J., & Fan, Y. (2020). How the supply and demand of steam coal affect the investment in clean energy industry? evidence from china. *Resources Policy*, 69 doi:10.1016/j.resourpol.2020.101788

Guihur, A. L., & Catalán, C. A. (2016). RELACIÓN ENTRE CAPITALIZACIÓN BURSÁTIL Y

EL CRECIMIENTO ECONÓMICO EN EL CONTEXTO COLOMBIANO.

- Habiba, U. E., & Zhang, W. (2020). The dynamics of volatility spillovers between oil prices and stock market returns at the sector level and hedging strategies: Evidence from pakistan. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(24), 30706-30715. doi:10.1007/s11356-020-09351-6
- Janda, K., Kristoufek, L., & Zhang, B. (2022). Return and volatility spillovers between chinese and U.S. clean energy related stocks. *Energy Economics*, 108 doi:10.1016/j.eneco.2022.105911
- Kanamura, T. (2020). A model of price correlations between clean energy indices and energy commodities. *Journal of Sustainable Finance and Investment*, doi:10.1080/20430795.2020.1753434
- Kocaarslan, B., & Soytaş, U. (2019). Dynamic correlations between oil prices and the stock prices of clean energy and technology firms: The role of reserve currency (US dollar). *Energy Economics*, 84 doi:10.1016/j.eneco.2019.104502
- Kumar, S., Managi, S., & Matsuda, A. (2012). Stock prices of clean energy firms, oil and carbon markets: A vector autoregressive analysis. *Energy Economics*, 34(1), 215-226. doi:10.1016/j.eneco.2011.03.002
- Lagos, P. A. (2017). ESTUDIO DE LA RELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE BURSÁTIL Y LOS PRINCIPALES ÍNDICES MACROECONÓMICOS EN AMÉRICA LATINA.
- Lee, Y. -, Huang, Y. -, & Wu, C. -. (2013). Conditional jump dynamics in the stock prices of alternative energy companies. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 3(3), 288-296. Retrieved from [www.scopus.com](http://www.scopus.com)
- López, J. (3 de octubre de 2017). Proceso estocástico. *Economipedia*.

<https://economipedia.com/definiciones/proceso-estocastico.html>

Mejdoub, H., & Ghorbel, A. (2018). Conditional dependence between oil price and stock prices of renewable energy: A vine copula approach. *Economic and Political Studies*, 6(2), 176-193. doi:10.1080/20954816.2018.1463600

Palazuelos, E. (2008) El mercado de petróleo, un mercado financiarizado. El petróleo y el gas en la geoestrategia mundial (pp. 439-474) Ediciones Akal. <http://www.unterseccionalroca.org.ar/imagenes/documentos/leg/Palazuelos%20Cap%20XV%20El%20mercado%20de%20petroleo%20un%20mercado%20financiarizado.pdf>

Ponce, P., Álvarez-García, J., Medina, J., & Del Río-Rama, M. C. (2021). Financial development, clean energy, and human capital: Roadmap towards sustainable growth in América Latina. *Energies*, 14(13) doi:10.3390/en14133763

Reboredo, J. C., & Ugolini, A. (2020). Price spillovers between rare earth stocks and financial markets. *Resources Policy*, 66 doi:10.1016/j.resourpol.2020.101647

Reboredo, J. C., & Ugolini, A. (2018). The impact of energy prices on clean energy stock prices. A multivariate quantile dependence approach. *Energy Economics*, 76, 136-152. doi:10.1016/j.eneco.2018.10.012

Santaella, J. (12 de septiembre de 2021) ¿Qué es el barril de Brent y cómo es la cotización de este petróleo? *Economía 3*. <https://economia3.com/que-es-barril-petroleo-brent/>

Schallenberg Rodríguez, J. C., Piernavieja Izquierdo, G., Hernández Rodríguez, C., & Unamunzaga Falcón, P. (2008). Energías renovables. Energías renovables y eficiencia energética (pp. 46-47). Instituto Tecnológico de Canarias. <https://www.cienciacanaria.es/files/Libro-de-energias-renovables-y-eficiencia-energetica.pdf>

Semana (17 de febrero de 2012) Ecopetrol le dijo adiós al WTI como referencia para vender crudo.

<https://www.semana.com/negocios/articulo/ecopetrol-dijo-adios-wti-como-referencia-para-vender-crudo/144998/>

Shahbaz, M., Trabelsi, N., Tiwari, A. K., Abakah, E. J. A., & Jiao, Z. (2021). Relationship between green investments, energy markets, and stock markets in the aftermath of the global financial crisis. *Energy Economics*, 104 doi:10.1016/j.eneco.2021.105655

Spiegeler, C., & Cifuentes, J. I. (2016). Definición e información de energías renovables [Conjunto de datos]. Repositorio del sistema bibliotecario Universidad de San Carlos de Guatemala. Recuperado de: <http://www.repositorio.usac.edu.gt/id/eprint/4455> [2021]

Umar, M., Farid, S., & Naeem, M. A. (2022). Time-frequency connectedness among clean-energy stocks and fossil fuel markets: Comparison between financial, oil and pandemic crisis. *Energy*, 240 doi:10.1016/j.energy.2021.122702

Wu, Y., Zhang, C., Yang, Y., Yang, X., Yun, P., & Cao, W. (2020). What happened to the CER market? A dynamic linkage effect analysis. *IEEE Access*, 8, 62322-62333. doi:10.1109/ACCESS.2020.2983429

Xm. (s.f.). ¿Cómo funciona el mercado mayorista eléctrico en Colombia? <https://www.xm.com.co/Paginas/Mercado-de-energia/descripcion-del-sistema-electrico-colombiano.aspx>

XM. (s.f.). Precio de bolsa y escasez. Recuperado el 15 octubre de 2021 de <https://www.xm.com.co/transacciones/cargo-por-confiabilidad/precio-de-bolsa-y-escasez>

Zhang, H., Cai, G., & Yang, D. (2020). The impact of oil price shocks on clean energy stocks: Fresh evidence from multi-scale perspective. *Energy*, 196 doi:10.1016/j.energy.2020.117099

Zhao, X. (2020). Do the stock returns of clean energy corporations respond to oil price shocks and

policy uncertainty? Journal of Economic Structures, 9(1) doi:10.1186/s40008-020-00229-x