



Escuela Técnica Superior de Ingeniería
(Comillas ICAI)

EFICIENCIA DEL MERCADO DEL AMONIACO: ¿ILUSIÓN O REALIDAD?

Clave del alumno: 201801545

Autor: Unai de la Fuente Camino

Directora: Karin Alejandra Irene Martin Bujack

Declaración de Uso de Herramientas de Inteligencia Artificial Generativa en Trabajos Fin de Grado

ADVERTENCIA: Desde la Universidad consideramos que ChatGPT u otras herramientas similares son herramientas muy útiles en la vida académica, aunque su uso queda siempre bajo la responsabilidad del alumno, puesto que las respuestas que proporciona pueden no ser veraces. En este sentido, NO está permitido su uso en la elaboración del Trabajo fin de Grado para generar código porque estas herramientas no son fiables en esa tarea. Aunque el código funcione, no hay garantías de que metodológicamente sea correcto, y es altamente probable que no lo sea.

Por la presente, yo, Unai de la Fuente Camino, estudiante de Grado en Administración y Dirección de Empresas de la Universidad Pontificia Comillas al presentar mi Trabajo Fin de Grado titulado "EFICIENCIA DEL MERCADO DEL AMONIACO: ¿ILUSIÓN O REALIDAD?", declaro que he utilizado la herramienta de Inteligencia Artificial Generativa ChatGPT u otras similares de IAG de código sólo en el contexto de las actividades descritas a continuación:

1. **Brainstorming de ideas de investigación:** Utilizado para idear y esbozar posibles áreas de investigación.
2. **Crítico:** Para encontrar contra-argumentos a una tesis específica que pretendo defender.
3. **Referencias:** Usado conjuntamente con otras herramientas, como Science, para identificar referencias preliminares que luego he contrastado y validado.
4. **Metodólogo:** Para descubrir métodos aplicables a problemas específicos de investigación.
5. **Corrector de estilo literario y de lenguaje:** Para mejorar la calidad lingüística y estilística del texto.
6. **Sintetizador y divulgador de libros complicados:** Para resumir y comprender literatura compleja.
7. **Revisor:** Para recibir sugerencias sobre cómo mejorar y perfeccionar el trabajo con diferentes niveles de exigencia.
8. **Traductor:** Para traducir textos de un lenguaje a otro.

Afirmo que toda la información y contenido presentados en este trabajo son producto de mi investigación y esfuerzo individual, excepto donde se ha indicado lo contrario y se han dado los créditos correspondientes (he incluido las referencias adecuadas en el TFG y he explicitado para que se ha usado ChatGPT u otras herramientas similares). Soy consciente de las implicaciones académicas y éticas de presentar un trabajo no original y acepto las consecuencias de cualquier violación a esta declaración.

Fecha: 20/05/2026

Firma:



RESUMEN EJECUTIVO

El estudio realizado investiga la eficiencia del mercado del amoniaco bajo el marco de la Hipótesis de Mercado Eficiente (EMH) en su forma débil. El objetivo es determinar si los precios de las acciones reflejan de forma completa la información histórica en un sector condicionado por la incertidumbre tecnológica y regulatoria de la economía del hidrógeno.

Metodológicamente, el trabajo desarrolla un proxy bursátil representativo de la cadena de valor y aplica herramientas de la física estadística, tales como el análisis de rango reescalado (R/S) y el análisis multifractal (MFDFA). Debido a la relativa juventud de este mercado, que limita la extensión de las series temporales a un periodo de 3,5 años, el análisis se define con una naturaleza eminentemente exploratoria. No obstante, la solidez de las estimaciones se garantiza mediante simulaciones de Monte Carlo y un análisis que evalúa el impacto de los valores extremos en la dinámica del mercado.

Los resultados revelan desviaciones sistemáticas respecto al comportamiento aleatorio, identificando patrones de memoria de largo plazo que son especialmente evidentes en el mercado global y el segmento tradicional. El análisis dinámico confirma que la eficiencia es una propiedad dependiente del régimen, donde los shocks geopolíticos refuerzan temporalmente la persistencia en las cotizaciones. Por su parte, el submercado de la transición energética (amoniaco verde) se caracteriza por presentar la estructura interna más heterogénea, con alternancias bruscas entre fases de corrección y tendencias prolongadas.

Se concluye que esta primera aproximación al análisis de eficiencia del mercado del amoniaco muestra propiedades estructurales robustas y no el resultado de ruido estadístico o eventos aislados. Esto sugiere que la valoración de activos en este sector requiere de modelos de riesgo que incorporen la naturaleza no lineal y la memoria de los precios, aportando evidencia crítica para inversores y responsables de políticas energéticas en el actual proceso de descarbonización.

Palabras clave: Amoniaco, Eficiencia de mercado, Exponente de Hurst, Análisis multifractal, Transición energética.

ABSTRACT

This study investigates the efficiency of the ammonia market within the framework of the Efficient Market Hypothesis (EMH) in its weak form. The aim is to determine whether share prices fully reflect historical information in a sector characterised by technological and regulatory uncertainty within the hydrogen economy.

Methodologically, the study develops a stock market proxy representative of the value chain and applies tools from statistical physics, such as rescaled range (R/S) analysis and multifractal analysis (MFDFA). Due to the relative youth of this market, which limits the length of the time series to a period of 3.5 years, the analysis is of a predominantly exploratory nature. Nevertheless, the robustness of the estimates is ensured through Monte Carlo simulations and an analysis that assesses the impact of extreme values on market dynamics.

The results reveal systematic deviations from random behaviour, identifying patterns of long-term memory that are particularly evident in the global market and the traditional segment. The dynamic analysis confirms that efficiency is a regime-dependent property, with geopolitical shocks temporarily reinforcing price persistence. For its part, the energy transition sub-market (green ammonia) is characterised by the most heterogeneous internal structure, with abrupt alternations between correction phases and prolonged trends.

It is concluded that this initial approach to the analysis of ammonia market efficiency reveals robust structural properties and is not the result of statistical noise or isolated events. This suggests that asset valuation in this sector requires risk models that incorporate the non-linear nature and price memory of the market, providing critical evidence for investors and energy policymakers in the current decarbonisation process.

Keywords: Ammonia, Market efficiency, Hurst exponent, Multifractal analysis, Energy transition.

TABLA DE CONTENIDOS

1. Introducción	7
1.1 Motivación y justificación del tema	7
1.2 Objetivos del trabajo	9
1.3 Estructura del trabajo.....	11
2. Contexto del mercado.....	13
2.1 El amoniaco como producto básico químico global.....	13
2.2 Huella de carbono y transición hacia un amoniaco más descarbonizado	14
2.3 Desarrollo del amoniaco verde	15
2.4 Amoniaco como vector de hidrógeno y comparativa con otros portadores	16
2.5 Panorama geográfico, actores y exposición empresarial.....	17
2.6 Relevancia financiera y conexión con el análisis de eficiencia.....	19
3. Metodología y base de datos	20
3.1 Enfoque y justificación de la metodología	20
3.2 Base de datos	30
4. Análisis de resultados.....	42
4.1 Resultados Estudio 1: “Mercado global”	42
4.2 Resultados Estudio 2: “Mercado tradicional”	47
4.3 Resultados Estudio 3: “Pure players”	52
4.4 Comparación de los 3 estudios realizados.....	57
5. Conclusiones.....	59
5.1 Principales hallazgos.....	59
5.2 Implicaciones para el mercado	60
5.3 Limitaciones del estudio.....	61
5.4 Futuras líneas de investigación	62
6. Bibliografía	64
7. Anexos	69
Anexo I: Descarga datos empresas.py.....	69
Anexo II: Estadísticas rendimientos.py	70
Anexo III: Análisis de datos.py	72

Índice de Tablas

Tabla 1: Empresas pertenecientes al Grupo 1	33
Tabla 2: Empresas pertenecientes al Grupo 2	36
Tabla 3: Estadísticas descriptivas rendimientos Grupo 1.....	38
Tabla 4: Estadísticas descriptivas rendimientos Grupo 2.....	39

Índice de Figuras

Figura 1: Rolling Hurst con las 30 empresas y datos sin winsorizar	43
Figura 2: MFDFA con las 30 empresas y datos sin winsorizar	44
Figura 3: Rolling Hurst con las 30 empresas y datos winsorizados	46
Figura 4: MFDFA con las 30 empresas y datos winsorizados	46
Figura 5: Rolling Hurst con las 27 empresas "tradicionales" y datos sin winsorizar	48
Figura 6: MFDFA con las 27 empresas "tradicionales" y datos sin winsorizar	49
Figura 7: Rolling Hurst con las 27 empresas "tradicionales" y datos winsorizados	50
Figura 8: MFDFA con las 27 empresas "tradicionales" y datos winsorizados	51
Figura 9: Rolling Hurst con las 3 empresas "pure players" y datos sin winsorizar	53
Figura 10: MFDFA con las 3 empresas "pure players" y datos sin winsorizar	54
Figura 11: Rolling Hurst con las 3 empresas "pure players" y datos winsorizados.....	56
Figura 12: MFDFA con las 3 empresas "pure players" y datos winsorizados.....	57

1. Introducción

1.1 Motivación y justificación del tema

El amoníaco es uno de los compuestos químicos más producidos del mundo y un insumo esencial para la agricultura moderna. La mayor parte de su producción global se destina a fertilizantes nitrogenados, que permiten sostener niveles de productividad muy superiores a los que serían posibles con fuentes orgánicas, y de los que depende en gran medida la seguridad alimentaria mundial (Valera-Medina et al., 2021).

Desde su producción a gran escala a partir del siglo XX, el amoníaco se ha consolidado como un producto estratégico que cuenta con grandes cadenas de suministro, plantas de síntesis e infraestructuras de almacenamiento y transporte específicas a lo largo de todo el mundo (Zamfirescu & Dincer, 2009).

En los últimos años, sin embargo, el papel del amoníaco está experimentando una transformación. A su uso tradicional como materia prima para fertilizantes se suma su potencial como vector energético en el contexto de transición hacia sistemas energéticos bajos en carbono. La posibilidad de producir amoníaco a partir de hidrógeno generado con electricidad renovable, conocido como “amoníaco verde”, ha situado a este compuesto en el centro de múltiples escenarios de economía del hidrógeno (International Energy Agency, 2019; Negro et al., 2023; Zhang & Fang, 2021). Además, el amoníaco puede almacenar hidrógeno de forma más densa y manejable que el hidrógeno molecular, aprovechar infraestructuras ya existentes y puede utilizarse directamente como combustible o como portador que se craquea de nuevo a hidrógeno en destino (Zamfirescu & Dincer, 2009; Kumar & Sleiti, 2024).

Esta nueva faceta como vector energético tiene implicaciones profundas para la estructura económica y financiera asociada al amoníaco. Empresas tradicionalmente centradas en fertilizantes han empezado a anunciar proyectos de amoníaco bajo en carbono, acuerdos de suministro a largo plazo y alianzas con compañías energéticas. Al mismo tiempo, no solo se contempla su uso como vector, sino que también se está empezando a considerar para funcionar como combustible en el transporte marítimo o en generación eléctrica (International Energy Agency, 2019; Valera-Medina et al., 2021).

En ausencia de un mercado financiero plenamente desarrollado de contratos específicos relacionados con el amoníaco verde, el canal más directo para observar cómo se incorpora

esta nueva realidad a las expectativas de los agentes económicos es el mercado bursátil del amoníaco. Los precios de las acciones de productores de amoníaco y fertilizantes, compañías químicas, empresas energéticas y tecnológicas vinculadas a esta cadena de valor reflejan, en mayor o menor medida, las expectativas del mercado sobre la evolución futura del amoníaco como producto básico y como vector energético (International Energy Agency, 2019).

En este contexto, resulta relevante analizar hasta qué punto estos precios son eficientes desde el punto de vista de la información, entendiendo por eficiencia que las cotizaciones reflejan de forma rápida y completa la información disponible sobre el amoníaco y su papel emergente como vector energético.

Si el mercado fuese eficiente en este sentido, no deberían existir patrones sistemáticos explotables en las series de precios, mientras que la presencia de ineficiencias indicaría una incorporación incompleta o sesgada de la nueva información, con posibles efectos sobre la asignación de capital y la formación de burbujas en el sector. Analizar la eficiencia de estos precios permite, por tanto, evaluar hasta qué punto el mercado bursátil está procesando adecuadamente la transición hacia el amoníaco verde o, por el contrario, la está valorando de forma distorsionada.

Este análisis resulta clave para inversores, reguladores y promotores de proyectos a la hora de interpretar correctamente las señales de precio y el coste de financiación.

La Hipótesis de Mercado Eficiente (EMH), en su forma débil, sostiene que los precios actuales incorporan toda la información contenida en la historia pasada de precios y volúmenes, de manera que no existen patrones sistemáticos en las series de rendimientos que puedan explotarse para obtener rendimientos anormales de forma persistente (Fama, 1965a, 1965b, 1970). Si la forma débil se cumple para las acciones de las empresas relacionadas con el amoníaco, ello implicaría que la información sobre la evolución de este mercado se incorpora de forma rápida y no sesgada a los precios.

Sin embargo, los sectores emergentes, sujetos a alta incertidumbre tecnológica y regulatoria, pueden mostrar comportamientos alejados de un paseo aleatorio, con episodios de persistencia, sobre-reacción o fases de reajuste prolongado (Nadarajah & Chu, 2017; Rizvi, 2014; Zhang & Fang, 2021; Saâdaoui, 2023). Además, la detección de memoria de largo plazo o de estructuras complejas en las series de rendimientos suele

interpretarse como indicio de ineficiencia en sentido débil (Ihlen, 2012; Wang et al., 2011).

En el caso del amoniaco, la coexistencia de un mercado químico maduro con una capa energética en construcción convierte a este contexto en un caso de estudio especialmente interesante para la literatura de eficiencia de mercados.

Por todo lo anterior, este trabajo se plantea en la intersección entre la transición energética basada en hidrógeno y amoniaco y la eficiencia del mercado del amoniaco. Para ello, se busca analizar si los precios de las acciones de las empresas expuestas al mercado del amoniaco reflejan de manera eficiente la información disponible, o si, por el contrario, existen patrones de dependencia temporal que sugieran desviaciones respecto a la forma débil de la EMH expuesta por Eugene Fama.

1.2 Objetivos del trabajo

A partir de la motivación anterior, el objetivo principal de este trabajo es:

“Evaluar la eficiencia en forma débil del mercado del amoniaco a partir de la cotización bursátil de las empresas más vinculadas a este sector (utilizada como proxy del mercado), mediante el análisis de la memoria de largo plazo y la complejidad de sus series temporales, con el fin de determinar hasta qué punto los precios incorporan de manera adecuada la información disponible y ofrecer evidencia útil para inversores, reguladores y promotores de proyectos ligados al amoniaco verde.”

De este objetivo principal se desprenden los siguientes objetivos específicos:

1. Identificar un conjunto representativo de empresas cotizadas cuya actividad presente una exposición directa con la producción, uso o desarrollo tecnológico del amoniaco y/o del amoniaco verde, para utilizarlo como un proxy del sector a partir de la información disponible.
2. Analizar la presencia de memoria de largo plazo en las series mediante estimadores del exponente de Hurst, tanto sobre la serie completa como a través de un enfoque de ventana móvil (*rolling window*).
3. Explorar la posible existencia de comportamientos complejos y heterogéneos mediante herramientas de análisis multifractal.

4. Comparar los resultados obtenidos con el comportamiento esperado bajo la hipótesis de eficiencia débil, utilizando como referencia procesos de ruido blanco o paseos aleatorios simulados.

Para alcanzar estos objetivos se plantea una metodología cuantitativa basada en técnicas fractales y multifractales aplicadas a las series de datos diarios de las acciones seleccionadas. Si la muestra cumple con la forma débil de la Hipótesis de Mercado Eficiente, los resultados se deberían comportar de manera cercana a un ruido blanco, sin memoria de largo plazo ni estructuras multifractales explotables (Fama, 1965a, 1965b, 1970; Weron, 2002). La detección sistemática de persistencia, antipersistencia o multifractalidad se interpreta, por tanto, como evidencia de desviaciones respecto a esa hipótesis (Ihlen, 2012; Wang et al., 2011; Zhang & Fang, 2021).

En una primera etapa, se emplea el análisis de rango reescalado (R/S) para estimar el exponente de Hurst de cada serie de rendimientos (Hurst, 1951). Este exponente resume, en un único parámetro, el grado de dependencia de largo plazo del proceso. Gracias a él se realiza una primera clasificación de las series en términos de proximidad o alejamiento respecto al patrón esperado bajo eficiencia.

Sin embargo, la dinámica de un sector en transición puede no ser estable en el tiempo. Por ello, el análisis R/S no se limita a una estimación estática, sino que se implementa sobre ventanas móviles (*rolling window*) de longitud fija.

Este enfoque permite observar cómo evoluciona el exponente de Hurst a lo largo del tiempo y detectar posibles cambios de régimen en la eficiencia del mercado, asociados, por ejemplo, a shocks regulatorios, anuncios de grandes proyectos o episodios de tensión en los mercados energéticos (Corzo Santamaría et al., 2022; Nadarajah & Chu, 2017). El resultado es una radiografía temporal de la eficiencia débil que va más allá de un único valor promedio.

En una segunda etapa, se recurre al Multifractal Detrended Fluctuation Analysis (MFDFA), una extensión de la familia DFA que permite caracterizar la multifractalidad de las series (Kantelhardt et al., 2002; Ihlen, 2012). Mientras que el R/S describe la dependencia de largo plazo con un único exponente, la MFDFA estima un espectro de exponentes asociado a diferentes órdenes de fluctuación, capturando así la posible coexistencia de dinámicas distintas para variaciones pequeñas y grandes en los rendimientos.

Esta característica es especialmente relevante en el contexto del amoniaco verde, donde las noticias sobre nuevos proyectos, cambios regulatorios o narrativas de transición energética pueden generar episodios de sobre-reacción o de respuesta desproporcionada a determinados shocks, que se manifiestan precisamente como asimetrías y estructuras multifractales en las colas de la distribución de rendimientos. La anchura del espectro multifractal y su forma se han utilizado en trabajos recientes para evaluar la complejidad y la ineficiencia de diferentes mercados bursátiles, especialmente en contextos de alta incertidumbre como la crisis financiera global o la pandemia de COVID-19 (Zhang & Fang, 2021; Saâdaoui, 2023), por lo que resulta una herramienta adecuada para estudiar la posible sobre-reacción del mercado ante la “historia” del amoniaco verde.

De este modo, la combinación de R/S con ventana móvil y MFDFA proporciona un marco metodológico capaz de captar tanto la dimensión temporal (cambios en la eficiencia a lo largo del tiempo) como la dimensión estructural (complejidad multifractal) de los precios de las acciones estudiadas, alineando la elección de herramientas con la naturaleza emergente y potencialmente no lineal del mercado del amoniaco en el contexto de la transición energética.

1.3 Estructura del trabajo

A continuación, se detalla la organización del trabajo tras este primer capítulo:

El Capítulo 2 desarrolla el contexto del amoniaco y su mercado. Se profundiza en el papel histórico del amoniaco como producto básico químico, analizando la aparición del amoniaco verde y su posible uso como vector de hidrógeno. Se describen además las principales características del mercado, incluyendo actores relevantes, cadenas de valor, dinámicas de oferta y demanda, y principales riesgos y oportunidades. El capítulo concluye conectando este contexto energético-industrial con la perspectiva financiera, destacando por qué resulta relevante estudiar las empresas expuestas a este mercado desde el prisma de la eficiencia.

En el Capítulo 3 se presenta la metodología seguida y la base de datos utilizada para el análisis. En él se detallan los fundamentos del exponente de Hurst, del análisis R/S y de la MFDFA, así como el enfoque de ventana móvil adoptado. También se describen los criterios de selección de las empresas analizadas, las fuentes de datos utilizadas, los pasos seguidos en el tratamiento de las series temporales y la construcción de las simulaciones de referencia.

El Capítulo 4 recoge los resultados empíricos. Se presentan, en primer lugar, los resultados del análisis estático de memoria de largo plazo, y posteriormente la evolución temporal en ventanas móviles. Además, se muestran los espectros obtenidos del análisis multifractal y se discuten sus implicaciones desde el punto de vista de la eficiencia de mercado.

Finalmente, el Capítulo 5 sintetiza las conclusiones más relevantes, discute sus implicaciones para inversores y reguladores, y propone posibles líneas de investigación futuras.

2. Contexto del mercado

2.1 El amoniaco como producto básico químico global

El amoniaco es una de las bases de la industria química moderna. Su producción se realiza casi en exclusiva mediante el proceso Haber-Bosch, que permite obtener amoniaco a partir de nitrógeno e hidrógeno bajo alta presión y temperatura, usando catalizadores metálicos, y constituye el método estándar de síntesis industrial desde principios del siglo XX (Zamfirescu & Dincer, 2009).

A escala mundial, la capacidad instalada de producción del amoniaco se sitúa en torno a 230-240 millones de toneladas anuales, mientras que la producción efectiva ha oscilado en los últimos años en torno a 150-190 millones de toneladas, dependiendo del ciclo económico y de los precios del gas natural (International Fertilizer Association, 2024; U.S. Geological Survey, 2023). Aproximadamente un 80% del amoniaco producido se destina a la fabricación de fertilizantes nitrogenados, principalmente urea, nitrato amónico y soluciones nitrogenadas. El 20% restante se reparte entre usos industriales como explosivos, fibras sintéticas, productos de limpieza, resinas, refrigerantes y otros productos químicos intermedios (Valera-Medina et al., 2021; International Fertilizer Association, 2024). Esta estructura de demanda no solo hace que el mercado del amoniaco esté fuertemente ligado al ciclo agrícola y a la demanda de alimentos, sino que también dependa de la actividad industrial global.

Respecto a la distribución geográfica, China es con diferencia el mayor productor mundial, con un 30% de la producción, seguida por Estados Unidos, la Unión Europea, India, Rusia y varios países de Oriente Medio y Norte de África (U.S. Geological Survey, 2023; Statista, 2025). Esta concentración geográfica responde tanto a la disponibilidad de gas natural, materia prima dominante en el modelo convencional, como a la cercanía a grandes mercados consumidores de fertilizantes.

No obstante, el comercio internacional de amoniaco representa solo una fracción de la producción total, ya que una parte importante de ésta se consume cerca de los centros de producción. Aun así, existe un mercado marítimo relevante, con flujos significativos desde regiones exportadoras (como Rusia, Golfo de México, Caribe, Norte de África y Oriente Medio) hacia grandes importadores netos como Europa Occidental o países asiáticos (International Energy Agency, 2019). Este comercio se apoya en una

infraestructura consolidada de terminales portuarias, buques gaseros (generalmente compartidos con GLP) y tanques de almacenamiento refrigerado.

Los precios del amoníaco, aunque se negocian en mercados de referencia y en algunos contratos de derivados, no cuentan con un mercado de futuros amplio y líquido comparable al de otras materias primas (como el crudo o el gas natural).

En consecuencia, su dinámica está fuertemente marcada por la evolución del precio del gas natural, las condiciones de oferta y demanda de fertilizantes, y episodios geopolíticos relevantes. Por ejemplo, la crisis energética europea o la invasión rusa de Ucrania han provocado cierres temporales de capacidad en Europa (como paradas de plantas o reducciones significativas de la producción cuando operar deja de ser económicamente viable) y repuntes significativos de precios en los últimos años, ilustrando la sensibilidad del mercado del amoníaco a los shocks en los mercados de energía (International Fertilizer Association, 2024; International Energy Agency, 2022).

2.2 Huella de carbono y transición hacia un amoníaco más descarbonizado

El modelo convencional de producción de amoníaco es intensivo en emisiones de gases de efecto invernadero. Al depender mayoritariamente del reformado de gas natural para la obtención de hidrógeno, la industria del amoníaco es responsable de una fracción significativa de las emisiones asociadas al sector químico global, estimada en torno al 1-2% de las emisiones globales de CO₂ (International Energy Agency, 2019).

Esta realidad coloca al sector bajo una creciente presión regulatoria, especialmente en regiones con políticas de descarbonización ambiciosas como la Unión Europea, donde se han fijado techos nacionales de emisión para contaminantes como el amoníaco y otros precursores de partículas (Directiva 2001/81/CE y su revisión mediante la Directiva (UE) 2016/2284), se han reforzado los estándares de calidad del aire y la monitorización de amoníaco en el medio ambiente (Directiva (UE) 2024/2881), y se han desplegado marcos específicos para impulsar combustibles renovables y de baja huella de carbono.

Como respuesta, han surgido dos grandes rutas para reducir la huella de carbono del amoníaco:

- **Amoníaco azul:** Producido a partir de hidrógeno obtenido por reformado de gas natural, pero incorporando tecnologías de captura y almacenamiento o utilización de carbono para retener una parte del CO₂ emitido en el proceso.

- **Amoníaco verde:** Sintetizado a partir de hidrógeno generado mediante electrólisis de agua alimentada por energías renovables, eliminando así las emisiones asociadas al uso de combustibles fósiles para la obtención de dicho hidrógeno.

Ambas rutas se consideran formas de amoníaco bajo en carbono, si bien difieren en su grado de reducción de emisiones, en sus costes y en su dependencia de infraestructuras de captación y almacenamiento del CO₂ (International Energy Agency, 2019).

Además, organismos como la Agencia Internacional de la Energía han identificado al amoníaco bajo en carbono como un vector prioritario para descarbonizar tanto la producción de fertilizantes como determinados usos energéticos industriales y de transporte pesado (International Energy Agency, 2019; Ojelade et al., 2023). El despliegue de estas tecnologías, sin embargo, depende de factores como el coste de la electricidad renovable, el coste de inversión y eficiencia de los electrolizadores, la disponibilidad de emplazamientos adecuados para el almacenamiento del CO₂ o los marcos regulatorios que reconozcan e impulsen los beneficios climáticos del amoníaco bajo en carbono como una alternativa viable.

2.3 Desarrollo del amoníaco verde

Aunque el volumen actual del amoníaco verde en operación comercial es todavía muy reducido respecto al total de la producción mundial, el número de proyectos anunciados y en desarrollo ha crecido de forma notable en los últimos años. Este aumento del interés por nuevas alternativas descarbonizadas ha impulsado la aparición de más de un centenar de proyectos de amoníaco verde y azul en distintas fases de desarrollo, con una capacidad conjunta anunciada de decenas de millones de toneladas anuales en el horizonte 2030 (International Energy Agency, 2019; International Fertilizer Association, 2024).

Algunas estimaciones recientes realizadas por organismos como la Asociación Internacional de Fertilizantes (IFA) sugieren que la capacidad de proyectos de amoníaco verde que podrían entrar en operación en la segunda mitad de esta década situaría la producción en varios millones de toneladas anuales. Esto supondría aún una fracción limitada del total, pero marcaría un punto de inflexión (International Fertilizer Association, 2024; UNFCCC, 2023).

Desde el punto de vista económico, el coste de producción del amoníaco verde viene determinado, en gran medida, por:

- El coste de la electricidad renovable (eólica, solar, hidroeléctrica, etc.).
- La inversión y eficiencia de los electrolizadores.
- La integración del sistema de electrólisis con el proceso Haber-Bosch.
- La escala de la planta y su factor de carga.

Estudios de coste nivelado indican que, en emplazamientos con recurso renovable abundante y barato, el amoníaco verde podría acercarse progresivamente a la competitividad del amoníaco convencional, especialmente si se internaliza el coste del carbono a través de instrumentos como los mercados de derechos de emisión o los ajustes en frontera por carbono (International Energy Agency, 2019; Valera-Medina et al., 2021).

A pesar de la incertidumbre sobre costes futuros, el interés de actores industriales y financieros es notable. Grandes consorcios, a menudo integrados por productores de fertilizantes, compañías energéticas y fondos de inversión, han anunciado proyectos de varios cientos de miles o incluso millones de toneladas anuales de amoníaco verde en regiones como Oriente Medio, Australia, Norte de África o América Latina (International Energy Agency, 2019; International Fertilizer Association, 2024). Muchos de estos proyectos se apoyan en acuerdos de compra a largo plazo con consumidores finales que buscan asegurar suministros de combustibles y materias primas bajos en carbono.

2.4 Amoníaco como vector de hidrógeno y comparativa con otros portadores

El uso del amoníaco como portador de hidrógeno ha recibido una atención creciente en la literatura técnica. El amoníaco líquido presenta una densidad volumétrica de hidrógeno superior a la del hidrógeno líquido, y puede almacenarse y transportarse a temperaturas y presiones menos extremas (Torrellas et al., 2025). Además, su infraestructura logística está ya desplegada y regulada, lo que reduce barreras de entrada frente a otros vectores emergentes.

En comparación, el hidrógeno molecular requiere tecnologías de compresión a muy alta presión o licuefacción criogénica, con elevados costes de inversión y operación, así como pérdidas energéticas por evaporación durante el transporte (Zamfirescu & Dincer, 2009).

Otros vectores propuestos, como los portadores orgánicos líquidos o el metanol, tienen sus propias ventajas e inconvenientes en términos de densidad energética, toxicidad,

madurez tecnológica y complejidad de los ciclos de carga y descarga. No obstante, su utilización como portadores de hidrógeno a gran escala se encuentra todavía en una fase de despliegue más incipiente que la del amoníaco.

Varios estudios (Ojelade et al., 2023; Torrellas et al., 2025; Valera-Medina et al., 2021) han comparado estas cadenas logísticas basadas en hidrógeno comprimido, hidrógeno licuado, amoníaco y otros portadores químicos. Las conclusiones suelen coincidir en que el amoníaco se perfila como un vector competitivo para el transporte marítimo de larga distancia y el almacenamiento estacional de energía, especialmente cuando se dispone de infraestructuras existentes y cuando la demanda objetivo se concentra en usos donde el amoníaco puede emplearse directamente como combustible (por ejemplo, en motores marinos adaptados). Por ello, este trabajo se centra en el amoníaco como caso de estudio principal.

No obstante, el uso energético del amoníaco plantea retos significativos dado que su combustión genera emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) que deben ser controladas mediante tecnologías de post tratamiento. La toxicidad de estos óxidos exige medidas estrictas de seguridad en manipulación y operación, y su proceso de *cracking*¹ para recuperar hidrógeno implica pérdidas de eficiencia y costes adicionales (Tan et al., 2024). Estas limitaciones condicionan las aplicaciones para las cuales el amoníaco resulta más adecuado y deben ser tenidas en cuenta en cualquier evaluación de su papel potencial en la transición energética.

2.5 Panorama geográfico, actores y exposición empresarial

La evolución del mercado del amoníaco, tanto en su versión tradicional como sus emergentes alternativas descarbonizadas, está estrechamente ligada a la geografía de la producción, al acceso a recursos energéticos y a las estrategias de cada región.

- Como hemos introducido anteriormente, China concentra alrededor de un tercio de la producción mundial de amoníaco, con un tejido industrial fuertemente integrado y orientado a satisfacer la demanda interna de fertilizantes (U.S. Geological Survey, 2023; Statista, 2025).

¹ Proceso químico que rompe moléculas grandes de hidrocarburos en moléculas más pequeñas mediante calor y/o catalizadores.

- Norteamérica combina grandes productores de fertilizantes con acceso a gas natural relativamente abundante y barato, y un creciente interés en proyectos de amoníaco azul y verde orientados tanto a la exportación como a la descarbonización de usos internos.
- Por su parte, Oriente Medio y Norte de África se perfilan como potenciales *hubs*² de producción de amoníaco bajo en carbono para exportación, aprovechando recursos renovables competitivos y experiencia en exportación de productos energéticos.
- Mientras, Europa presenta una producción más limitada y costosa, pero una demanda significativa y objetivos climáticos ambiciosos, lo que la sitúa como mercado objetivo principal para las exportaciones de amoníaco verde y azul (International Energy Agency, 2019).

Desde el punto de vista empresarial, pueden distinguirse varios tipos de compañías cotizadas con exposición al amoníaco:

- a. Productores integrados de fertilizantes y amoníaco: Compañías cuyo negocio principal es la producción de amoníaco y fertilizantes nitrogenados, y que están desarrollando estrategias de descarbonización mediante captura de carbono, electrificación o integración de hidrógeno verde.
- b. Empresas energéticas y *utilities*³: Actores que exploran el uso del amoníaco como combustible en generación eléctrica, como vector de almacenamiento estacional o como parte de sus estrategias de hidrógeno.
- c. Navieras y operadores logísticos: Empresas implicadas en el desarrollo de buques y terminales adaptados al uso de amoníaco como combustible marino o como carga principal.
- d. Fabricantes de equipos y tecnología: Compañías que suministran electrolizadores, compresores, equipos criogénicos, turbinas, motores, sistemas de combustión y tecnologías de cracking.

² Infraestructura que agrupa empresas bajo un mismo paradigma o territorio, fomentando innovación, estabilidad o retención de talento entre otros factores.

³ Empresas de servicios públicos que suministran a la comunidad servicios esenciales como luz, agua, gas, combustibles, telecomunicaciones, etc.

La exposición de cada uno de estos segmentos al mercado del amoníaco puede ser directa (por sus ingresos y márgenes) o indirecta (por su sensibilidad a la regulación climática, a los precios del carbono o a las expectativas sobre la economía del hidrógeno). Esta diversidad de modelos de negocio hace que, incluso dentro del “universo del amoníaco”, la respuesta de las cotizaciones a nuevas informaciones o shocks pueda ser heterogénea.

2.6 Relevancia financiera y conexión con el análisis de eficiencia

Las dinámicas descritas no son exclusivamente tecnológicas o industriales, también se pueden traducir en decisiones de inversión, valoración y asignación de capital en los mercados financieros. La construcción de nuevas plantas de amoníaco verde, la adaptación de infraestructuras portuarias, el desarrollo de flotas de buques propulsados por amoníaco o la reconversión de carteras de activos por parte de grandes productores de fertilizantes requieren un volumen significativo de financiación, que en muchos casos se obtiene a través de los mercados de capitales.

En un escenario de mercados eficientes en forma débil, la incorporación de nueva información relevante sobre estos factores debería reflejarse de manera rápida y no sistemáticamente predecible en los precios de las acciones (Fama, 1965a, 1965b, 1970).

Sin embargo, la combinación de complejidad técnica, horizontes temporales largos, dependencia de marcos regulatorios y narrativas sobre la transición energética puede dar lugar a periodos en los que las cotizaciones se alejen de un comportamiento puramente aleatorio, mostrando tendencias prolongadas, episodios de sobre-reacción o fases de ajuste lento (Zhang & Fang, 2021; Saâdaoui, 2023). Evaluar si las series temporales de las acciones de empresas expuestas al mercado del amoníaco se comportan de forma consistente con la hipótesis de eficiencia débil, o si presentan patrones de dependencia temporal o complejidad estadística incompatibles con ella, resulta por tanto relevante tanto desde una perspectiva académica como desde el punto de vista práctico de los inversores y reguladores (Rizvi, 2014; Ihlen, 2012; Wang et al., 2011; Zhang & Fang, 2021; Saâdaoui, 2023).

Esta evaluación exige el uso de herramientas capaces de capturar no solo autocorrelaciones de corto plazo, sino también memorias de largo alcance y estructuras multifractales, cuestiones que se abordarán en detalle en el Capítulo 3, dedicado a la metodología de análisis.

3. Metodología y base de datos

3.1 Enfoque y justificación de la metodología

El amoníaco, tradicionalmente un producto químico vinculado a fertilizantes, está adquiriendo un papel emergente como vector energético y portador de hidrógeno. Esta doble naturaleza ha provocado que en los últimos años hayan surgido estrategias de negocio y decisiones de inversión por parte de empresas cotizadas que operan en los diferentes eslabones de su cadena de valor.

La literatura existente sobre el amoníaco y el amoníaco verde se ha centrado principalmente en análisis tecno-económicos de las distintas rutas de producción, comparativas de costes frente a tecnologías convencionales y evaluaciones del papel del amoníaco como vector energético en la descarbonización de la industria y el transporte.

En paralelo, los informes del mercado describen el crecimiento esperado del amoníaco verde, la estructura competitiva del sector y las oportunidades de inversión asociadas (Fortune Business Insights, 2024), pero suelen adoptar una perspectiva industrial o estratégica, sin analizar de forma explícita el comportamiento estadístico de las cotizaciones bursátiles de las empresas más expuestas al amoníaco ni su grado de eficiencia informacional en el sentido de la hipótesis de Fama. Hasta donde alcanza la revisión realizada, no se han identificado estudios que evalúen la eficiencia en forma débil del mercado del amoníaco utilizando un proxy construido a partir de empresas cotizadas vinculadas a su cadena de valor y aplicando técnicas de análisis de memoria de largo plazo y complejidad de las series temporales.

El objetivo de este capítulo es presentar el marco metodológico utilizado para evaluar si el proxy construido de empresas del mercado del amoníaco es consistente con la forma débil de la Hipótesis de Mercado Eficiente (EMH) o si, por el contrario, presenta indicios de ineficiencia, aportando así evidencia novedosa sobre cómo el mercado bursátil incorpora la información relacionada con el desarrollo del amoníaco (y en particular del amoníaco verde) a las cotizaciones de las compañías más expuestas.

En su formulación clásica, la EMH en forma débil expuesta por Eugene Fama sostiene que los precios actuales de los activos financieros incorporan completamente la información contenida en su propia historia, de modo que los rendimientos pasados no permiten predecir sistemáticamente los rendimientos futuros (Fama, 1965a, 1965b,

1970). Desde un punto de vista estadístico, esta hipótesis se traduce en que la serie de rendimientos puede aproximarse a un proceso sin memoria de largo plazo, similar a un ruido blanco o a un paseo aleatorio (Weron, 2002).

La estrategia metodológica adoptada en este trabajo se apoya en tres pilares:

1. Análisis de rango reescalado (R/S) para estimar el exponente de Hurst (H) de las series de rendimientos, tanto de forma estática (sobre toda la muestra) como dinámica, mediante un esquema de ventana móvil (*rolling window*) (Hurst, 1951; Mandelbrot & Wallis, 1969; Weron, 2002).
2. Multifractal Detrended Fluctuation Analysis (MFDFA) para caracterizar la posible multifractalidad de las series y obtener medidas adicionales de complejidad, como la anchura del espectro multifractal (Kantelhardt et al., 2002; Ihlen, 2012; Wang et al., 2011).
3. Comparación con procesos de referencia de ruido blanco, generados mediante simulaciones, con el fin de construir bandas de confianza para H y para los indicadores multifractales, y así evaluar el significado estadístico de las desviaciones observadas (Weron, 2002; Rizvi, 2014; Zhang & Fang, 2021; Saâdaoui, 2023).

La combinación de estos tres elementos permite abordar la eficiencia débil desde dos perspectivas. Por un lado, se cuantifica la presencia (o ausencia) de memoria de largo plazo en los rendimientos. Mientras que, por el otro, se analiza la estructura de escalas de la serie para detectar patrones multifractales asociados con ineficiencia e inestabilidad (Ihlen, 2012; Wang et al., 2011; Zhang & Fang, 2021).

No obstante, las series de rendimientos financieros suelen contener observaciones extremas que pueden distorsionar de forma desproporcionada las estadísticas utilizadas en el análisis, distorsionando la interpretación de los resultados. Es por ello por lo que, con el fin de ganar una mayor robustez en las conclusiones, se realiza un ejercicio extra de *winsorización* para estudiar el posible impacto de los valores extremos en la persistencia y la multifractalidad.

En las secciones siguientes se describen con detalle los pasos de cada uno de los procedimientos estadísticos empleados.

3.1.1 Análisis de rango reescalado (R/S) y exponente de Hurst

El análisis de rango reescalado (R/S) fue introducido originalmente por Hurst en 1951 en el estudio del caudal del Nilo y posteriormente formalizado por Mandelbrot y Wallis en 1969. Su objetivo es estimar el exponente de Hurst H , variable que cuantifica la presencia de dependencia de largo plazo en una serie temporal.

En términos generales si:

- $H = 0.5$ indica ausencia de memoria de largo plazo (comportamiento tipo ruido blanco o paseo aleatorio).
- $H > 0.5$ indica persistencia, es decir, que las tendencias tienden a prolongarse y que los movimientos en una dirección tienen mayor probabilidad de ser seguidos por movimientos en la misma dirección.
- $H < 0.5$ indica antipersistencia o reversión a la media, donde los movimientos tienden a revertirse con mayor probabilidad (Mandelbrot & Wallis, 1969; Weron, 2002).

Bajo el contexto de la EMH débil, los valores de H significativamente distintos a 0,5 se interpretan como evidencia de desviaciones respecto al comportamiento eficiente (Lo & MacKinlay, 1988; Wang et al., 2011; Hosking, 1981).

Procedimiento estático de estimación de H mediante R/S

Dado un conjunto de rendimientos $\{r_t\}_{t=1}^N$, el procedimiento R/S puede describirse en los siguientes pasos (Hurst, 1951; Mandelbrot & Wallis, 1969; Weron, 2002):

Paso 1. Selección de tamaños de submuestra

Se elige un conjunto de longitudes de submuestra $\{n_k\}$, típicamente en progresión creciente, sujeto a $n_k < N$.

Paso 2. Partición de la serie en bloques de longitud n

Para cada longitud $n = n_k$, se divide la serie $\{r_t\}$ en $M = \lfloor N/n \rfloor$ bloques consecutivos (subseries) de longitud n :

$$\{r_1, \dots, r_n\}, \{r_{n+1}, \dots, r_{2n}\}, \dots, \{r_{(M-1)n+1}, \dots, r_{Mn}\}$$

Paso 3. Cálculo de la media y desviación estándar en cada bloque

Para cada bloque $m = 1, \dots, M$, se calcula:

$$\bar{r}_m = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n r_{m,t}, s_m = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (r_{m,t} - \bar{r}_m)^2}$$

Donde $r_{m,t}$ denota el valor del rendimiento en la posición t del bloque m .

Paso 4. Serie acumulada centrada

Se construye, para cada bloque m , la serie acumulada centrada:

$$X_m(k) = \sum_{t=1}^k (r_{m,t} - \bar{r}_m), k = 1, \dots, n$$

Paso 5. Rango y rango reescalado

El rango del bloque m se define como:

$$R_m(n) = \max_{1 \leq k \leq n} X_m(k) - \min_{1 \leq k \leq n} X_m(k)$$

El rango reescalado es:

$$\left(\frac{R}{S}\right)_m(n) = \frac{R_m(n)}{s_m}$$

Paso 6. Promedio sobre bloques

El rango reescalado promedio para la longitud n es:

$$E \left[\frac{R}{S}(n) \right] = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \left(\frac{R}{S}\right)_m(n)$$

Paso 7. Relación de escala y estimación de H

Para procesos con memoria de largo plazo, el rango reescalado promedio sigue asintóticamente una relación de potencia con el tamaño de la submuestra (Hurst, 1951; Mandelbrot & Wallis, 1969):

$$E \left[\frac{R}{S}(n) \right] \propto n^H$$

Tomando logaritmos:

$$\ln \left(E \left[\frac{R}{S}(n) \right] \right) = \ln C + H \cdot \ln n$$

Donde C es una constante. Por tanto, estimando una regresión lineal de $\ln (E[R/S(n)])$ sobre $\ln n$ para los distintos valores de n , la pendiente de la recta ajustada proporciona una estimación del exponente de Hurst \hat{H} .

En la práctica, se selecciona un rango de escalas $[n_{\min}, n_{\max}]$ que equilibre:

- Suficiente número de bloques para promediar,
- Variedad de escalas temporales,
- Estabilidad numérica (Weron, 2002; Ceballos & Largo, 2017).

Análisis R/S en ventana móvil (rolling window)

El análisis estático descrito anteriormente produce un único valor de \hat{H} para toda la serie, que resume el comportamiento promedio de largo plazo. Sin embargo, los mercados financieros pueden experimentar cambios en su grado de eficiencia a lo largo del tiempo (Nadarajah & Chu, 2017; Zhang & Fang, 2021).

Para capturar esta dimensión temporal, se implementa un análisis R/S en ventana móvil:

1. Se elige una longitud de ventana W .
2. Para cada posición $t = W, W + 1, \dots, T$, se considera la subserie de rendimientos $\{r_{t-W+1}, \dots, r_t\}$.
3. Sobre cada subserie se aplica exactamente el procedimiento R/S descrito en la sección anterior, obteniendo una estimación local de Hurst \hat{H}_t .
4. La colección $\{\hat{H}_t\}_{t=W}^T$ define una serie temporal de exponentes de Hurst, que permite observar la evolución de la dependencia de largo plazo a lo largo del tiempo.

Esta aproximación ha sido empleada en estudios recientes para analizar la dinámica de eficiencia en mercados desarrollados y emergentes, así como para identificar periodos asociados a crisis financieras o shocks de volatilidad (Corzo Santamaría et al., 2022; Zhang & Fang, 2021; Saâdaoui, 2023).

3.1.2 Multifractal Detrended Fluctuation Analysis (MFDFA)

El análisis R/S asume implícitamente que el proceso puede caracterizarse mediante un único exponente de escala H , es decir, que la serie es monofractal. Sin embargo, numerosos estudios han demostrado que los mercados financieros exhiben con frecuencia multifractalidad, donde su estructura de dependencia se relaciona tanto con la magnitud de las fluctuaciones como con la escala temporal considerada (Kantelhardt et al., 2002; Ihlen, 2012; Wang et al., 2011).

La MFDFA es una extensión del análisis de fluctuación sin tendencia (DFA) que permite estimar, para una serie temporal, un conjunto de exponentes de escala $h(q)$ asociados a momentos de orden q , así como el correspondiente espectro multifractal $f(\alpha)$ (Kantelhardt et al., 2002). La anchura y forma de este espectro se utilizan como indicadores de complejidad e ineficiencia en activos financieros (Rizvi, 2014; Zhang & Fang, 2021; Saâdaoui, 2023). Dada la serie de rendimientos $\{r_t\}_{t=1}^N$, el algoritmo MFDFA se compone de los siguientes pasos (Kantelhardt et al., 2002; Ihlen, 2012):

Paso 1. Construcción del perfil integrado

Se define el perfil de la serie como:

$$Y(i) = \sum_{t=1}^i (r_t - \bar{r}), i = 1, \dots, N$$

Donde \bar{r} es la media de la serie de rendimientos.

Paso 2. División en segmentos de longitud s

Se elige un conjunto de escalas s (tamaños de ventana), típicamente en progresión geométrica, con $s_{\min} \leq s \leq s_{\max}$ y $s_{\max} < N$. Para cada escala s , el perfil $Y(i)$ se divide en:

- $N_s = \lfloor N/s \rfloor$ segmentos no solapados de longitud s comenzando desde el inicio.
- Otros N_s segmentos comenzando desde el final, lo que da un total de $2N_s$ segmentos.

Paso 3. *Detrending*⁴ local en cada segmento

Para cada segmento $\nu = 1, \dots, 2N_s$, se ajusta un polinomio de orden m al perfil dentro del segmento, $Y_\nu(i)$, y se calcula la serie residual detrendida:

$$\epsilon_\nu(i) = Y_\nu(i) - y_\nu^{(m)}(i), i = 1, \dots, s$$

Donde $y_\nu^{(m)}(i)$ es el polinomio ajustado.

Paso 4. Cálculo de la fluctuación local

Para cada segmento ν se calcula la varianza *detrendida*:

$$F^2(\nu, s) = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s [\epsilon_\nu(i)]^2$$

Paso 5. Fluctuación de orden q

Para cada escala s y para un conjunto de órdenes q , se define la función de fluctuación de orden q como:

$$F_q(s) = \left\{ \frac{1}{2N_s} \sum_{\nu=1}^{2N_s} [F^2(\nu, s)]^{\frac{q}{2}} \right\}^{\frac{1}{q}}, q \neq 0$$

Para $q = 0$, se utiliza el límite:

$$F_0(s) = \exp \left\{ \frac{1}{4N_s} \sum_{\nu=1}^{2N_s} \ln[F^2(\nu, s)] \right\}$$

Paso 6. Relación de escala y función de Hurst generalizada

Si la serie presenta comportamiento multifractal, la función $F_q(s)$ exhibe una ley de potencia con la escala s :

$$F_q(s) \propto s^{h(q)}$$

Donde $h(q)$ es la función de Hurst generalizada. Para estimar $h(q)$, se ajusta, para cada valor de q , una regresión lineal de $\ln F_q(s)$ frente a $\ln s$, y la pendiente proporciona $\hat{h}(q)$.

⁴ Identificación y eliminación de componentes de baja frecuencia que no forman parte de la dinámica fluctuante que se desea estudiar.

En el caso monofractal, $h(q)$ es constante para todos los q , mientras que en el caso multifractal, $h(q)$ varía con q , reflejando la heterogeneidad de la dinámica para fluctuaciones de distinta magnitud (Kantelhardt et al., 2002; Ihlen, 2012).

A partir de $h(q)$, se define el exponente de escala:

$$\tau(q) = qh(q) - 1$$

Mediante una transformada de Legendre, se obtiene el espectro multifractal $f(\alpha)$:

$$\alpha = \frac{d\tau(q)}{dq}, f(\alpha) = q\alpha - \tau(q)$$

Donde α es el exponente de singularidad (o Hölder) y $f(\alpha)$ describe la dimensión fractal de los subconjuntos de la serie caracterizados por un valor dado de α (Kantelhardt et al., 2002).

En la práctica, el espectro $f(\alpha)$ se estima de forma numérica y se caracteriza mediante:

- Su anchura $\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$.
- Su forma (simetría, asimetría hacia colas izquierdas o derechas).
- La posición del máximo.

Una anchura pequeña de $\Delta\alpha$ sugiere un comportamiento cercano a la monofractalidad (y, por tanto, potencialmente más compatible con eficiencia), mientras que una anchura grande indica multifractalidad pronunciada, asociada en la literatura a ineficiencias de mercado, asimetrías informacionales y regímenes de volatilidad cambiantes (Ihlen, 2012; Rizvi, 2014; Zhang & Fang, 2021; Saâdaoui, 2023).

3.1.3 Simulaciones de ruido blanco y bandas de referencia

Incluso series generadas por un ruido blanco finito pueden producir estimaciones de H ligeramente distintas de 0,5 y espectros multifractales con anchuras no nulas, debido a efectos de tamaño muestral y a la propia naturaleza de los estimadores (Weron, 2002; Ceballos & Largo, 2017; Annis & Lloyd, 1976).

Para evitar interpretar desviaciones anómalas como evidencia de ineficiencia, se adopta una estrategia de contraste basada en simulaciones de Monte Carlo bajo la hipótesis nula:

“ H_0 : La serie de rendimientos sigue un proceso eficiente en forma débil, aproximable por un ruido blanco independiente e idénticamente distribuido.”

Bajo esta hipótesis, se generan M series sintéticas de ruido blanco, con la misma longitud que las series reales, y se les aplica exactamente el mismo procedimiento R/S y MF DFA. Para cada estadístico de interés (por ejemplo, el exponente de Hurst), las M simulaciones producen una distribución empírica a partir de la cual se obtienen percentiles (5% y 95%), que se utilizan como bandas de referencia. El valor M se ajusta en función del procedimiento empleado y la carga computacional del mismo.

Simulaciones para H estático

Para cada acción analizada:

1. Se toma la longitud N de su serie de rendimientos.
2. Se generan M series simuladas de ruido blanco $\{\epsilon_t^{(j)}\}_{t=1}^N$ con $j = 1, \dots, M$, donde $\epsilon_t^{(j)} \sim \mathcal{N}(0,1)$.
3. A cada serie simulada se le aplica el procedimiento R/S descrito en la *Sección 3.3.2*, obteniendo un conjunto de estimaciones $\{\hat{H}^{(j)}\}_{j=1}^M$.
4. Se calculan percentiles de la distribución de $\hat{H}^{(j)}$.
5. La estimación \hat{H} obtenida para la serie real se compara con estos percentiles:
 - Si \hat{H} cae dentro del intervalo de confianza, no se rechaza la hipótesis de eficiencia débil en términos de memoria de largo plazo.
 - Si \hat{H} cae sistemáticamente fuera del intervalo, se interpreta como evidencia de desviación respecto al comportamiento de un proceso eficiente, rechazando así la hipótesis nula.

Simulaciones para H en ventanas móviles (rolling window)

El mismo razonamiento se extiende al análisis en ventana móvil:

1. Se elige la longitud de ventana W .
2. Sobre cada serie simulada de ruido blanco $\{\epsilon_t^{(j)}\}$ se calcula la secuencia $\{\hat{H}_t^{(j)}\}_{t=W}^N$ mediante el procedimiento de ventana móvil descrito anteriormente.

3. Para cada posición temporal t , se obtiene la distribución de valores $\{\widehat{H}_t^{(j)}\}_{j=1}^M$.
4. Se calculan, para cada t , los percentiles como 5 % y 95 %.
5. Estas bandas definen, para cada instante, el rango de valores de H que serían esperables bajo un proceso eficiente.

La serie $\{\widehat{H}_t\}$ se superpone a estas bandas:

- Periodos donde \widehat{H}_t se mantiene dentro de las bandas sugieren comportamientos compatibles con eficiencia.
- Intervalos donde \widehat{H}_t se sitúa persistentemente fuera de ellas apuntan a episodios de ineficiencia temporal, que pueden relacionarse después con eventos de mercado o desarrollos específicos del sector del amoniaco (Zhang & Fang, 2021; Saâdaoui, 2023).

Simulaciones para indicadores multifractales

De forma análoga, para la MF DFA:

1. Se aplica el algoritmo MF DFA a la serie real y se calculan indicadores como:
 - La función $h(q)$.
 - El espectro $f(\alpha)$.
 - La anchura $\Delta\alpha$.
2. Se generan M series simuladas de ruido blanco con la misma longitud y se aplica la MF DFA, obteniendo un conjunto $\{\Delta\alpha^{(j)}\}_{j=1}^M$.
3. Se calculan percentiles de $\Delta\alpha^{(j)}$ para establecer qué anchuras son típicas de un proceso de referencia eficiente.
4. Si la anchura de la serie real es significativamente mayor que los percentiles superiores de la distribución simulada, se interpreta como evidencia de multifractalidad no atribuible únicamente a efectos de tamaño muestral, y por tanto como señal de ineficiencia débil (Ihlen, 2012; Rizvi, 2014; Wang et al., 2011).

3.1.4 Winsorización

La *winsorización* consiste en reemplazar los valores más extremos por percentiles menos extremos de la propia distribución, en lugar de eliminar las observaciones. Para este estudio, se usa una *winsorización* al 1% (bilateral), donde los rendimientos por debajo del percentil 1 se sustituyen por el valor del percentil 1, y los rendimientos por encima del percentil 99 se sustituyen por el valor del percentil 99. De este modo, se reduce la influencia de posibles observaciones extremas manteniendo intacto el tamaño muestral y la estructura básica de la serie.

El efecto de los valores extremos puede repercutir tanto en los resultados R/S (estático y dinámico) como en los resultados del MF DFA, por lo que para aplicar una metodología coherente se han calculado los resultados tanto sin *winsorización* como con *winsorización*. De esta forma se puede comprobar el impacto en cada uno de los estudios realizados.

3.2 Base de datos

A diferencia de otros mercados de materias primas con instrumentos financieros específicos (índices sectoriales, ETF o futuros líquidos), en el caso del amoníaco no se ha identificado ningún ETF ni índice bursátil que pueda considerarse un proxy directo y ampliamente representativo de su mercado. Por este motivo, en lugar de apoyarse en un vehículo existente, este trabajo construye un proxy empírico ad hoc a partir de las cotizaciones de un conjunto seleccionado de empresas.

Es por ello por lo que antes de aplicar las metodologías descritas, es necesario definir con precisión las series temporales que serán objeto de análisis y el universo de empresas a partir del cual se construye este proxy bursátil del “mercado del amoníaco”.

3.2.1 Selección y tratamiento de los datos

La base de datos del estudio está compuesta por acciones de empresas cotizadas con exposición económica al amoníaco, ya sea a través de:

- Producción directa de amoníaco o fertilizantes nitrogenados.
- Participación en proyectos de amoníaco azul o verde.
- Actividad en transporte y logística de amoníaco.

- Desarrollo de tecnologías asociadas (electrólisis, combustión de amoníaco, *cracking* a hidrógeno, etc.).

Estas cotizaciones se utilizan como proxy observable del conjunto de expectativas del mercado de capitales sobre la evolución del amoníaco como producto básico químico y como vector energético.

La selección de compañías se ha realizado de forma intencional, dado que no existen ETFs que puedan ser utilizados de referencia, por lo que para realizar esta selección se han seguido los siguientes criterios:

- **Exposición económica al amoníaco/amoníaco verde:**
Se priorizan empresas cuyos ingresos, márgenes o decisiones de inversión estén relacionados con el mercado del amoníaco (fertilizantes nitrogenados, soluciones de amoníaco, proyectos de amoníaco limpio, etc.), de modo que sus precios de acción incorporen de forma sensible la información relevante sobre este mercado.
- **Disponibilidad y calidad de la información bursátil:**
Se exige que las empresas coticen en mercados organizados con un historial mínimo de precios de cierre diarios suficiente para la aplicación robusta de las metodologías de memoria de largo plazo y multifractalidad. Asimismo, se exige una continuidad razonable de la serie (ausencia de largos periodos sin cotización).

La selección resultante busca presentarse como un paso inicial y necesario para delimitar un mercado que sigue en construcción, pudiendo así realizar una primera aproximación de su eficiencia desde el punto de vista financiero.

Para cada empresa i , se construye la serie de precios de cierre diarios $P_{i,t}$, donde $t = 1, 2, \dots, T$ denota el tiempo en días hábiles de mercado. A partir de estos precios se calculan los rendimientos logarítmicos:

$$r_{i,t} = \ln \left(\frac{P_{i,t}}{P_{i,t-1}} \right), t = 2, \dots, T$$

El uso de rendimientos logarítmicos es estándar en finanzas por sus propiedades de aditividad y su interpretación aproximada como variaciones porcentuales para cambios moderados (Cont, 2001). Sobre cada serie de rendimientos se aplican los siguientes pasos de limpieza:

- Exclusión de días sin cotización o con datos faltantes.
- Comprobación de valores extremos debidos a errores de registro.

Las metodologías R/S y MFDFA se aplican siempre sobre la serie $\{r_{i,t}\}$, y no sobre los precios de las acciones.

La muestra final está compuesta por 30 empresas cotizadas, organizadas en dos grupos según su perfil de exposición:

- **Grupo 1:** Empresas del mercado tradicional del amoniaco y fertilizantes (27 empresas)
- **Grupo 2:** *Pure players* del amoniaco verde e hidrógeno (3 empresas)

En ambos casos, se trata de empresas que operan en diferentes eslabones de la cadena de valor, pero con una relación directa con el amoniaco. El objetivo no es construir un índice exhaustivo del sector químico o energético, sino un proxy representativo de las compañías para las cuales el amoniaco (convencional o bajo en carbono) es un activo esencial.

Grupo 1: Empresas del mercado tradicional del amoniaco (27 empresas)

El Grupo 1 está formado por 27 compañías cotizadas cuya actividad presenta una exposición económica directa con el amoniaco y, sobre todo, con los fertilizantes nitrogenados. En todas ellas, el amoniaco (como materia prima, producto intermedio o producto final en forma de fertilizantes) constituye un activo que influye en los ingresos, márgenes o decisiones de inversión, aunque la mayoría mantiene carteras diversificadas con inversiones o producción en otros productos químicos, agroindustriales o energéticos. Esta combinación permite construir un proxy bursátil representativo del mercado tradicional del amoniaco sin limitarse únicamente a productores “puros”.

Las empresas incluidas en el grupo 1 son:

Tabla 1: Empresas pertenecientes al Grupo 1

Empresa	Ticker	Región Principal	Descripción
CF Industries Holdings Inc.	CF	Norteamérica	Productor líder de fertilizantes nitrogenados (amoniaco, urea, UAN ⁵) con fuerte exposición al precio del gas natural y al ciclo agrícola
Yara International ASA	YAR.OL	Europa	Multinacional especializada en fertilizantes y soluciones de amoniaco para agricultura e industria, con presencia global.
Nutrien Ltd.	NTR	Norteamérica	Grupo integrado de fertilizantes y servicios agrícolas, con divisiones de potasa, nitrógeno y fosfatos.
OCI N.V.	OCI.AS	Europa/MENA ⁶	Productor de fertilizantes nitrogenados y metanol, con plantas en Europa, Norteamérica y Oriente Medio.
The Mosaic Company	MOS	Norteamérica	Compañía centrada en fertilizantes fosfatados y potásicos con exposición relevante a productos nitrogenados.
CVR Partners LP	UAN	Norteamérica	Productor de fertilizantes nitrogenados (UAN, amoniaco) con activos en Estados Unidos.
LSB Industries Inc.	LXU	Norteamérica	Productor de productos químicos basados en nitrógeno para fertilizantes e industria.
Orica Ltd.	ORI.AX	Australia/Global	Empresa de explosivos industriales y productos químicos que utiliza amoniaco en la fabricación de nitrato amónico.
Coromandel International Ltd.	COROMANDEL.NS	India/Asia	Productor y distribuidor de fertilizantes complejos, fosfatados y nitrogenados en el mercado indio.
BASF SE	BAS.DE	Europa/Global	Uno de los mayores grupos químicos mundiales, con líneas relevantes en productos nitrogenados y soluciones para agricultura.
Huntsman Corp.	HUN	Norteamérica/Global	Compañía química diversificada con exposición a productos intermedios que utilizan amoniaco y derivados.
Arkema S.A.	AKE.PA	Europa/Global	Grupo químico especializado en materiales avanzados y productos intermedios, algunos ligados a cadenas nitrogenadas.
Clariant AG	CLN.SW	Europa/Global	Empresa química centrada en especialidades, catalizadores y soluciones industriales relacionadas con procesos de amoniaco.
K+S AG	SDF.DE	Europa	Productor de fertilizantes y sales minerales, con exposición al mercado agrícola europeo.
Intrepid Potash Inc.	IPI	Norteamérica	Productor de potasa y fertilizantes, con participación en soluciones para agricultura en Norteamérica.
Bunge Ltd.	BG	Global	Grupo agroindustrial integrado, activo en cadenas de valor agrícolas donde los fertilizantes nitrogenados son insumo clave.

⁵ Nitrato de amonio

⁶ Oriente medio y norte de África

Empresa	Ticker	Región Principal	Descripción
Sumitomo Chemical Co. Ltd.	4005.T	Asia	Gran conglomerado químico japonés, con divisiones de agroquímicos y productos relacionados con fertilizantes.
Israel Chemicals Ltd.	ICL	Oriente Medio	Productor de fertilizantes, productos químicos especiales y soluciones para agricultura con presencia global.
Grupa Azoty S.A.	ATT.WA	Europa	Principal productor polaco de fertilizantes nitrogenados y productos químicos asociados al amoníaco.
Kemira Oyj	KEMIRA.HE	Europa	Empresa química orientada a tratamientos de agua y soluciones industriales con uso de productos derivados del amoníaco.
GAIL Ltd.	GAIL.NS	India/Asia	Empresa de gas natural y petroquímica, con exposición a la cadena de valor de fertilizantes y amoníaco en India.
Tata Chemicals Ltd.	TATACHEM.NS	India/Global	Productor de productos químicos industriales y fertilizantes, con actividad relevante en el mercado indio.
Chambal Fertilisers & Chemicals	CHAMBLFERT.NS	India	Uno de los mayores productores de fertilizantes nitrogenados en India, con foco en urea y productos asociados.
Mitsui Chemicals Inc.	4183.T	Asia/Global	Compañía química japonesa con líneas de negocio en materiales y productos básicos, incluyendo derivados nitrogenados.
Mitsubishi Chemical Group	4188.T	Asia/Global	Conglomerado químico con áreas de productos básicos e intermedios donde el amoníaco es materia prima relevante.
Asahi Kasei Corp.	3407.T	Asia/Global	Grupo diversificado con negocios en materiales, productos químicos y soluciones industriales ligadas a la química del nitrógeno.
China XLX Fertiliser Ltd.	1866.HK	China/Asia	Productor chino de fertilizantes nitrogenados (urea, UAN, etc.) con fuerte vinculación al mercado doméstico de amoníaco.

La selección de estas 27 compañías no pretende ser exhaustiva respecto a todo el universo de empresas con alguna relación con el amoníaco, sino construir un proxy empírico acotado del segmento del mercado donde el amoníaco y los fertilizantes nitrogenados constituyen un pilar relevante del negocio. En este sentido, se han aplicado los siguientes criterios de inclusión:

- **Peso del amoníaco/fertilizantes en el modelo de negocio:** se han priorizado productores integrados de fertilizantes nitrogenados y químicos con líneas claras de productos ligados al amoníaco. Se han excluido otros grandes conglomerados químicos o energéticos en los que la actividad relacionada con el amoníaco es claramente marginal frente a otros segmentos más voluminosos.
- **Representatividad dentro de la cadena de valor:** se han incorporado tanto productores de fertilizantes (CF, Yara, Nutrien, Mosaic, OCI, Coromandel, Chambal, China XLX, etc.) como empresas químicas y agroindustriales para las que el amoníaco y los derivados nitrogenados son insumos o productos relevantes (BASF, Arkema, Sumitomo Chemical, Bunge, etc.), de forma que el grupo refleje la diversidad de eslabones del mercado tradicional.
- **Cobertura geográfica mínima:** se ha buscado que estén representadas las principales regiones productoras y consumidoras (Norteamérica, Europa, India/Asia, Oriente Medio/China), evitando que el proxy quede sesgado hacia una única jurisdicción o tipo de mercado.
- **Liquidez y continuidad de la serie de precios:** se han seleccionado empresas con cotización continuada y suficiente liquidez en mercados organizados, descartando emisores con volúmenes muy reducidos, listados secundarios poco líquidos o históricos demasiado cortos que impidieran una aplicación robusta de las metodologías de memoria de largo plazo y multifractalidad.

Dentro del amplio universo de compañías potencialmente vinculadas al amoníaco, se ha considerado que estas 27 empresas constituyen un conjunto manejable y representativo en el que el amoníaco y los fertilizantes nitrogenados son un activo central de la valoración, lo que justifica su uso como proxy del segmento maduro del mercado del amoníaco.

Grupo 2: Pure players⁷ del amoníaco verde

El Grupo 2 agrupa a 3 empresas cuyo modelo de negocio está fuertemente orientado al desarrollo de tecnologías de hidrógeno verde y proyectos de amoníaco bajo en carbono. A diferencia del Grupo 1, estas compañías no son grandes productores de amoníaco convencional, sino actores especializados en la transición energética, cuya valoración depende de forma muy directa de la evolución de las tecnologías de electrólisis, de los marcos regulatorios y de la viabilidad económica del amoníaco verde.

Las empresas seleccionadas para representar al grupo 2 son:

Tabla 2: Empresas pertenecientes al Grupo 2

Empresa	Ticker	Región Principal	Descripción
Nel ASA	NEL.OL	Europa	Empresa especializada en electrolizadores y soluciones integradas de hidrógeno verde, con participación en proyectos de amoníaco verde como vector de exportación.
ITM Power Plc	ITM.L	Europa	Fabricante de electrolizadores PEM para producción de hidrógeno renovable, proveedor de tecnología clave para proyectos de amoníaco verde y power-to-x.
Aker Horizons ASA	AKH.OL	Europa	Plataforma de inversiones en tecnologías limpias y proyectos de hidrógeno y amoníaco bajo en carbono, con enfoque en transición energética.

En el caso del Grupo 2, la muestra se restringe a tres compañías consideradas *pure players* de la transición hacia el amoníaco bajo en carbono. La elección se ha guiado por los siguientes criterios:

- **Focalización estratégica en hidrógeno verde y amoníaco bajo en carbono:** Nel ASA e ITM Power son fabricantes de electrolizadores con un posicionamiento claro en proyectos de hidrógeno renovable, incluidos proyectos en los que el hidrógeno se convierte en amoníaco para facilitar su transporte o exportación. Aker Horizons, por su parte, opera como plataforma de inversión en proyectos de hidrógeno y amoníaco verde a gran escala.
- **Grado de “pureza” respecto a la transición energética:** se han excluido grandes *utilities* o compañías energéticas diversificadas que, aun participando en proyectos de amoníaco verde, mantienen la mayor parte de su negocio en generación convencional o hidrocarburos. El objetivo es que las cotizaciones del grupo estén altamente apalancadas al éxito o fracaso de la nueva cadena de valor del amoníaco verde, y no diluidas por otras líneas de negocio dominantes.

⁷ Empresas que operan un solo modelo de negocio sin tener presencia fuera de su especialidad.

- **Disponibilidad de series bursátiles razonables:** pese a su relativa juventud, estas empresas cuentan con históricos de precios diarios suficientes para realizar una primera aproximación útil y niveles de liquidez que permiten aplicar los métodos de análisis temporal con un mínimo de fiabilidad. Este ha sido un principal factor de exclusión, dado que había otras empresas candidatas que no contaban con la disponibilidad suficiente (ya fuera por encontrarse en mercado poco fiables o porque su trazabilidad era limitada).

En conjunto, estas tres compañías se utilizan como un proxy concentrado del submercado emergente del amoníaco verde e hidrógeno dado que sus cotizaciones sintetizan las expectativas del mercado sobre la viabilidad tecnológica, regulatoria y económica de esta nueva cadena de valor.

Diferencia entre grupos

En resumen, el Grupo 1 recoge empresas en las que el amoníaco y los fertilizantes nitrogenados forman parte de un negocio maduro y consolidado, donde el principal motor de riesgo es el comportamiento del mercado de fertilizantes, el coste del gas natural y el ciclo agrícola/industrial. Mientras que el Grupo 2 agrupa empresas cuyo valor depende sobre todo de la transición hacia el amoníaco verde y el hidrógeno renovable, y que operan en un entorno de mayor incertidumbre tecnológica y regulatoria.

Esta separación permite analizar por separado la eficiencia en forma débil del segmento tradicional y del segmento emergente vinculado al amoníaco, y comparar su comportamiento estadístico.

Los precios de cierre diarios se han obtenido de Yahoo Finance, complementados cuando ha sido necesario con documentación corporativa. Se ha decidido utilizar Yahoo Finance por ser una fuente de datos financieros ampliamente empleada en estudios empíricos, que ofrece acceso consistente a series históricas de precios ajustados para una amplia gama de mercados y tickers, facilitando así la construcción homogénea de la base de datos y del proxy bursátil analizado.

3.2.2 Análisis estadístico de los rendimientos

Teniendo clara la selección de empresas a analizar para llevar a cabo la aproximación sobre la eficiencia del mercado de amoniaco, a continuación, se comparten los resultados estadísticos de los rendimientos de estas:

Grupo 1: “Mercado tradicional”

Tabla 3: Estadísticas descriptivas rendimientos Grupo 1

Empresa	Media	Desviación Típica	Asimetría	Curtosis
CF	0.078%	2.374%	-0.129	1.992
YAR.OL	0.044%	1.819%	0.000	8.710
NTR	0.033%	2.151%	-0.442	3.225
OCIAS	0.052%	2.475%	0.104	12.148
MOS	-0.014%	2.649%	-0.454	2.437
UAN	0.140%	2.779%	-0.119	4.520
LXU	0.083%	3.853%	0.804	8.450
ORLAX	0.040%	1.442%	0.503	9.460
COROMANDEL.NS	0.090%	1.867%	0.015	1.821
BAS.DE	0.000%	1.776%	0.003	3.087
HUN	-0.046%	2.453%	0.217	3.555
AKE.PA	-0.027%	1.962%	-0.049	2.199
CLN.SW	-0.060%	1.842%	-0.410	9.959
SDF.DE	0.054%	2.468%	-0.097	3.317
IPI	0.015%	3.870%	-0.333	4.620
BG	0.039%	1.835%	0.171	5.018
4005.T	0.005%	1.940%	-0.383	3.944
ICL	0.003%	2.332%	-0.465	4.336
ATT.WA	-0.054%	2.543%	0.219	4.923
KEMIRA.HE	0.042%	1.736%	-0.168	11.044
GAIL.NS	0.064%	1.992%	-0.563	9.050
TATACHEM.NS	0.003%	2.053%	0.200	6.432
CHAMBLFERT.NS	0.071%	2.548%	0.672	9.401
4183.T	0.024%	1.942%	-0.075	3.404
4188.T	0.028%	1.831%	-0.477	8.038
3407.T	0.036%	1.621%	-0.237	3.511
1866.HK	0.120%	3.032%	0.271	3.463
PROMEDIO	0.032%	2.266%	-0.045	5.632

Grupo 2: “Pure players”

Tabla 4: Estadísticas descriptivas rendimientos Grupo 2

Empresa	Media	Desviación Típica	Asimetría	Curtosis
NEL.OL	-0.190%	4.301%	0.705	9.412
ITM.L	-0.104%	4.593%	0.471	5.894
AKH.OL	-0.646%	8.375%	-15.603	376.111
PROMEDIO	-0.313%	5.757%	-4.809	130.472

Como se puede observar en la Tabla 3, las empresas tradicionales presentan un rendimiento medio diario de alrededor de 0.03% con una desviación típica de 2.27%. Estos valores muestran una volatilidad moderada, común en el sector industrial, que contrasta con el Grupo 2 (Tabla 4) que presenta rendimientos medios negativos (-0.31%) y una volatilidad mayor (5.76%). Dicha diferencia de volatilidad (casi 2.5 veces superior) refleja una naturaleza especulativa del sector verde, caracterizado por una mayor incertidumbre.

Analizando asimetría, se observa como los rendimientos de las empresas “tradicionales” presentan una distribución relativamente simétrica al presentar un promedio de -0.05. No obstante, el valor promediado de 5.63 para curtosis sugiere una presencia de colas pesadas y eventos extremos más frecuentes que una distribución normal, lo cual es característico de series financieras. Por su parte, los “*pure players*” muestran patrones diferentes, al presentar tanto asimetría como curtosis elevadas, sugiriendo una mayor frecuencia de rendimientos positivos, pero con incidencia significativa de eventos de cola. Cabe destacar en este grupo que Aker Horizons distorsiona significativamente el promedio del Grupo 2 al presentar valores extremos.

Dichas diferencias observadas sugieren distintos niveles de madurez del mercado, donde la mayor volatilidad y comportamiento atípico de los “*pure players*” pueden anticipar diferencias en los patrones de eficiencia de mercado que van a ser explorados mediante R/S y MFDFA. Este análisis estadístico también ha sido relevante para confirmar la necesidad de realizar un análisis con *winsorización* al haber observado una presencia significativa de valores extremos.

3.2.3 Plan de análisis de los datos

Con el fin de capturar tanto una visión agregada del comportamiento bursátil del conjunto de empresas vinculadas al amoniaco como las diferencias entre el segmento tradicional y el emergente, se plantean tres estudios complementarios, todos ellos basados en las metodologías descritas en el capítulo 3.

Estudio 1: Mercado “global” del amoniaco

En este primer estudio se analizan conjuntamente las series de rendimientos de las 30 empresas de la base de datos, con un horizonte temporal de 3 años y medio. Este horizonte viene determinado por las empresas con historial de cotización más corto, lo que obliga a homogeneizar la longitud de las series para poder compararlas de forma consistente. Aunque esta restricción reduce el número de observaciones disponibles para algunas compañías maduras, se considera que el periodo elegido es suficientemente amplio para obtener estimaciones informativamente útiles de los exponentes de Hurst y de las medidas de multifractalidad.

Estudio 2: Segmento tradicional del amoniaco

El segundo estudio se centra exclusivamente en las 27 empresas del Grupo 1, ligadas al mercado convencional del amoniaco y de los fertilizantes. En este caso también se emplea un horizonte temporal de 3 años y medio, dado que algunas de las empresas no cuentan con datos diarios más antiguos. Este análisis proporciona una visión específica del comportamiento de un segmento maduro del mercado.

Estudio 3: Segmento emergente del amoniaco verde

El tercer estudio se centra en las tres empresas del Grupo 2, consideradas “*pure players*” de la transición hacia el amoniaco verde, con modelos de negocio altamente expuestos a la evolución de las tecnologías de hidrógeno renovable y a los marcos regulatorios asociados. Como se ha señalado, la relativa juventud bursátil de estas empresas hace que el horizonte de análisis deba limitarse nuevamente a 3 años y medio, lo que mantiene un grado de incertidumbre en las estimaciones, pero permite obtener una primera aproximación al comportamiento de este segmento emergente.

En todos los casos, la misma batería de herramientas (análisis R/S, MF DFA, contraste mediante simulaciones de Monte Carlo y ejercicio de comparación con y sin *winsorización*) se aplica a las series de rendimientos de cada empresa y a los agregados

por grupo, siendo la única diferencia entre estudios el conjunto de empresas incluido en cada análisis.

El objetivo de este diseño es doble. Por un lado, se busca construir un proxy bursátil del “mercado del amoniacó” que permita evaluar la eficiencia en forma débil de las cotizaciones en su conjunto. Y, por otro lado, se busca descomponer dicha evaluación en sus componentes estructurales, analizando por separado el segmento tradicional y el submercado emergente asociado al amoniacó verde.

De este modo, los resultados permiten no solo valorar la eficiencia del proxy agregado, sino también identificar posibles diferencias en la dinámica de memoria y complejidad entre los distintos perfiles empresariales que conforman la cadena de valor del amoniacó.

4. Análisis de resultados

4.1 Resultados Estudio 1: “Mercado global”

Hurst estático

El análisis del conjunto “global” de empresas vinculadas al amoniaco comienza con la estimación del estadístico de Hurst sobre la serie agregada de rendimientos sin tratamiento adicional (datos RAW).

El valor medio obtenido, $H = 0.580$, se sitúa por encima del umbral de 0.5 asociado a un comportamiento puramente aleatorio sin memoria, aunque con una intensidad moderada. Esta primera evidencia sugiere que, a nivel global, los rendimientos tienden a mostrar cierta persistencia, de modo que los movimientos pasados no se cancelan completamente en el proceso de formación de precios.

La robustez de esta apreciación inicial se contrasta mediante una simulación de Monte Carlo. El intervalo de confianza del 5-95% para H se encuentra en $[0.50277676, 0.56450272, 0.63337093]$, donde el valor intermedio representa la mediana de la simulación. Comparando este rango con el valor empírico, se observa que el empírico se sitúa por encima de la mediana y relativamente próximo al extremo superior del rango simulado. Desde un punto de vista estadístico, esto indica que el desplazamiento hacia valores superiores a 0.5 no puede interpretarse como una mera fluctuación alrededor de la eficiencia, sino que responde a una estructura de dependencia temporal apreciable.

El mercado global del amoniaco muestra, por tanto, un patrón que se aparta de la plena eficiencia en su forma débil.

Evolución temporal

La incorporación de la dimensión temporal a través del Hurst en ventana móvil permite matizar esta primera conclusión. La Figura 1 representa la evolución del estadístico a lo largo del periodo muestral, incluyendo la localización temporal de los dos eventos geopolíticos considerados (conflicto de Gaza y tensiones EE. UU.-Irán).

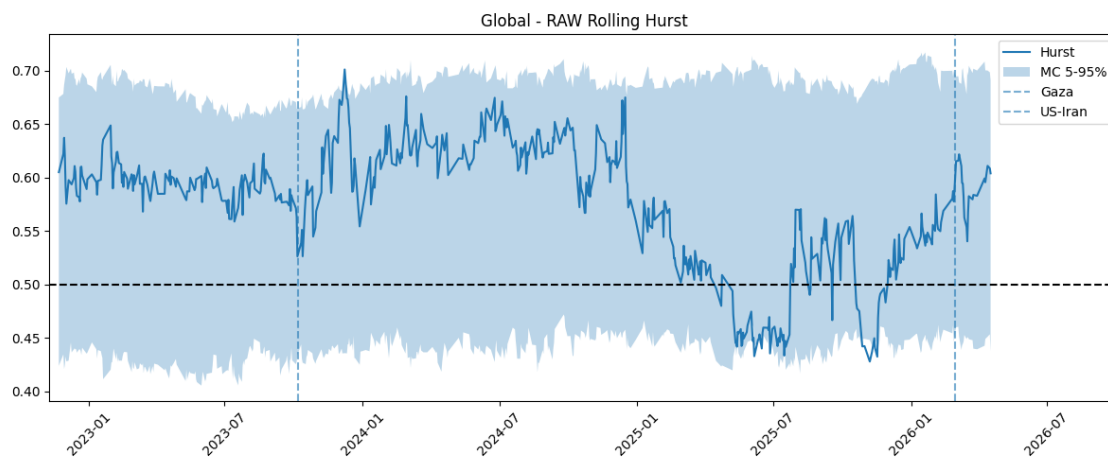


Figura 1: Rolling Hurst con las 30 empresas y datos sin winsorizar

El gráfico muestra que el Hurst móvil comienza en niveles claramente superiores a 0.55, se mantiene en rangos persistentemente elevados durante buena parte del periodo inicial y solo se corrige en fases posteriores.

En los meses previos al conflicto de Gaza, el estadístico oscila en torno a valores comprendidos entre aproximadamente 0.58 y 0.62, lo que apunta a un comportamiento persistentemente estructurado en la serie de rendimientos del mercado global. Tras la aparición del primer evento, se aprecia un refuerzo de esta dinámica, donde el Hurst aumenta y alcanza máximos próximos o superiores a 0.65-0.70. Estos valores se mantienen en niveles elevados durante un periodo prolongado, en línea con una reacción fuertemente correlacionada de los agentes ante el shock geopolítico. A partir de 2025, la trayectoria del Hurst móvil cambia de signo. El estadístico desciende de forma progresiva, cruzando el umbral de 0.5 y alcanzando mínimos en torno a 0.43-0.45 en determinados intervalos, lo que indica la aparición de fases de antipersistencia y, en términos prácticos, de correcciones rápidas que revierten movimientos previos.

En el tramo final de la muestra, coincidiendo con el segundo evento, el Hurst comienza a recuperarse y se sitúa de nuevo en torno al umbral de 0.5 o ligeramente por encima, sugiriendo una cierta reestabilización del patrón de dependencia. En conjunto, la evidencia de la ventana móvil pone de manifiesto que la eficiencia del mercado global es claramente dependiente del régimen, intensificándose la memoria en torno a shocks geopolíticos y debilitándose hasta llegar a la antipersistencia local en fases posteriores de ajuste.

Evidencia de multifractalidad

El análisis multifractal mediante MFDFA aporta una dimensión adicional para caracterizar el comportamiento del mercado global. La anchura del espectro multifractal estimada sobre los datos RAW es $\Delta\alpha = 0.516$, lo que indica una heterogeneidad dinámica significativa en la serie de rendimientos agregados. La Figura 2 muestra un espectro ancho, con un máximo situado alrededor de $\alpha \approx 0.50$ y colas que se extienden hacia valores inferiores y superiores, reflejando la coexistencia de distintos regímenes de volatilidad y dependencia en el tiempo.

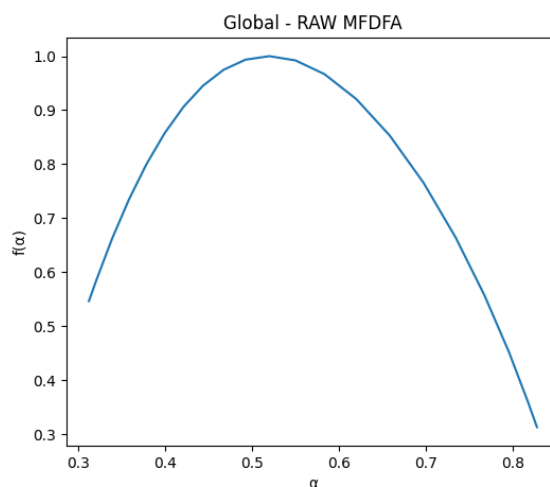


Figura 2: MFDFA con las 30 empresas y datos sin winsorizar

La comparación de este resultado con las simulaciones de Monte Carlo refuerza la interpretación de una multifractalidad no trivial. El intervalo del 5-95% para $\Delta\alpha$ se sitúa en $[0.07017885, 0.19506422, 0.38942532]$, mientras que el valor empírico (0.516) se encuentra claramente por encima del límite superior de la banda.

Esta posición relativa indica que la amplitud del espectro no puede atribuirse únicamente a la aleatoriedad inherente a un proceso nulo, sino que revela una estructura multifractal estadísticamente relevante. Desde la perspectiva financiera, ello implica que el mercado global presenta una diversidad considerable de escalas temporales y comportamientos locales, con episodios de alta y baja volatilidad que no se ajustan a un patrón homogéneo de mercado eficiente.

Interpretación

En términos agregados, el valor medio de H se sitúa de forma clara en la región de persistencia, con una posición dentro de las bandas de Monte Carlo que avala su relevancia estadística frente al modelo nulo. La dinámica temporal muestra que dicha persistencia se refuerza en torno al conflicto de Gaza, mientras que se debilita e incluso da lugar a episodios de antipersistencia local en el periodo posterior, antes de recuperar niveles próximos a la aleatoriedad en el entorno del segundo evento geopolítico.

Por su parte, la amplitud del espectro multifractal, estadísticamente significativa, indica que la serie presenta una estructura interna compleja, caracterizada por la coexistencia de múltiples escalas y regímenes de volatilidad. Desde la óptica de la hipótesis de mercado eficiente en su forma débil, estos resultados sugieren que el mercado global del amoníaco no puede describirse como plenamente eficiente. Esto implica que la información histórica y el contexto geopolítico continúan influyendo de manera apreciable en la dinámica de los precios.

Análisis de robustez: winsorización de retornos

Con el fin de evaluar hasta qué punto estos resultados podían estar condicionados por observaciones extremas, se ha repetido el ejercicio aplicando una winsorización de los retornos (datos WINSOR).

En términos de Hurst estático, el efecto de este tratamiento es prácticamente neutro, donde el valor medio pasa de $H = 0.580$ a $H = 0.581$, manteniéndose en la región de persistencia. El nuevo intervalo de Monte Carlo, $[0.49808597, 0.57311284, 0.63790781]$, sigue situando el estadístico empírico en la parte alta de la distribución nula, de modo que la conclusión de ineficiencia débil permanece inalterada. La Figura 3 muestra un patrón temporal muy similar al obtenido con datos RAW.

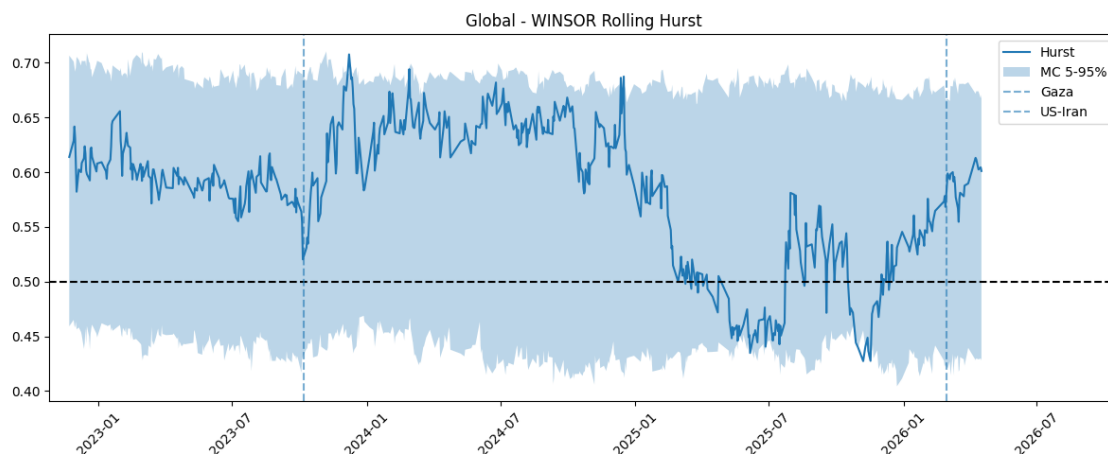


Figura 3: Rolling Hurst con las 30 empresas y datos winsorizados

Se pueden observar fases de elevada persistencia alrededor del conflicto de Gaza, descenso posterior hacia valores próximos o inferiores a 0.5 y recuperación parcial en el tramo final del periodo. La winsorización no modifica, por tanto, la lectura cualitativa de la dependencia temporal, sino que simplemente suaviza oscilaciones locales.

Donde sí se aprecia un cambio más visible es en la intensidad de la multifractalidad. Tras la winsorización, la anchura del espectro multifractal se reduce de $\Delta\alpha = 0.516$ a $\Delta\alpha = 0.392$, lo que indica que una parte de la complejidad captada en el análisis RAW estaba asociada a movimientos extremos en las colas de la distribución de rendimientos. Sin embargo, incluso con datos WINSOR, el valor de $\Delta\alpha$ continúa excediendo el intervalo de Monte Carlo [0.06939408, 0.20310109, 0.35848766], de modo que la multifractalidad sigue siendo estadísticamente significativa.

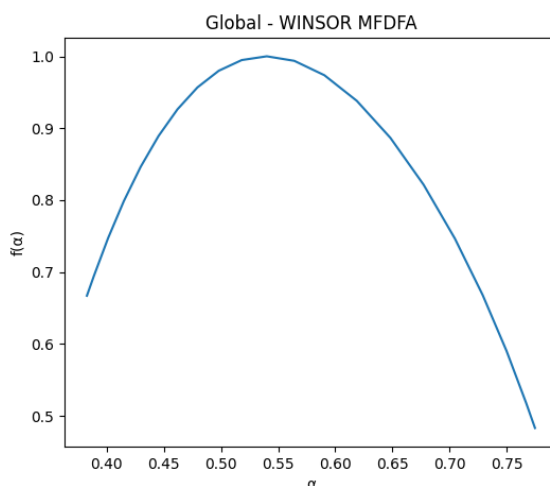


Figura 4: MFDFA con las 30 empresas y datos winsorizados

La Figura 4 muestra un espectro algo más estrecho, pero todavía amplio, con forma y posición del máximo muy similares a las obtenidas en el caso RAW. En consecuencia, el tratamiento de los valores extremos reduce la magnitud de la complejidad multifractal. No obstante, el mercado global del amoniaco mantiene una estructura persistente y multifractal, incluso cuando se controla por la influencia de observaciones extremas.

4.2 Resultados Estudio 2: “Mercado tradicional”

Hurst estático

El análisis del subconjunto de empresas “tradicionales” de amoniaco comienza también con la estimación del estadístico de Hurst sobre la serie agregada de rendimientos sin tratamiento adicional (datos RAW).

El valor medio obtenido, $H = 0.561$, se sitúa por encima del umbral de 0.5 asociado a un comportamiento puramente aleatorio sin memoria, aunque con una intensidad moderada. Esta primera evidencia sugiere que, en el segmento tradicional, los rendimientos tienden a mostrar persistencia, de modo que los movimientos pasados no se cancelan completamente en el proceso de formación de precios.

Nuevamente, esta apreciación inicial se contrasta con una simulación de Monte Carlo. El intervalo de confianza del 5-95% para H devuelve un rango de $[0.49998981, 0.56892847, 0.62294168]$, lo que implica que el valor empírico se sitúa ligeramente por encima del centro de la distribución nula y relativamente próximo al extremo superior del rango simulado.

Desde un punto de vista estadístico, se vuelve a apreciar una estructura de dependencia temporal apreciable. Aunque la magnitud de la desviación es algo menor que en el mercado global, el segmento tradicional muestra igualmente un patrón que se aparta de la plena eficiencia en su forma débil.

Evolución temporal

La incorporación de la dimensión temporal a través del Hurst en ventana móvil permite reforzar esta primera conclusión. La Figura 5 representa la evolución del estadístico a lo largo del periodo muestral, incluyendo la localización temporal del conflicto de Gaza y de las tensiones entre Estados Unidos e Irán.

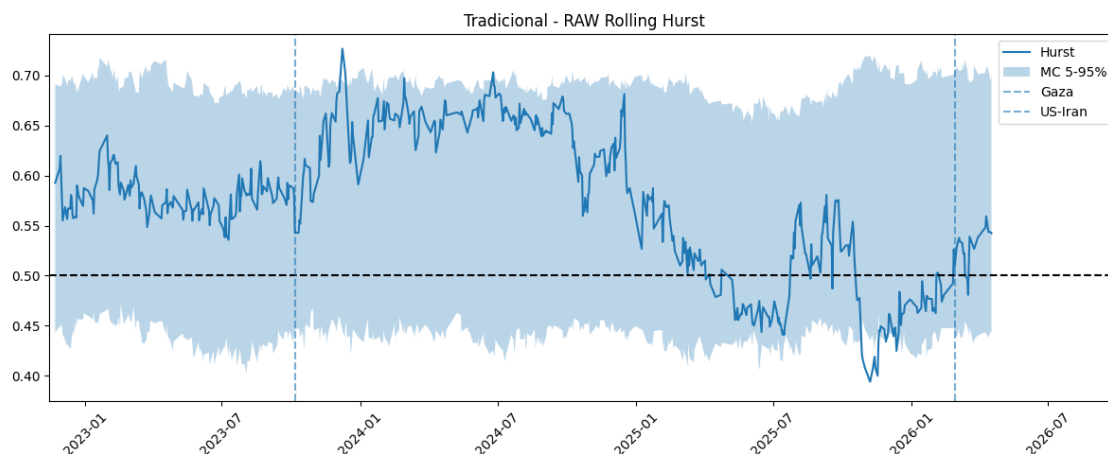


Figura 5: Rolling Hurst con las 27 empresas "tradicionales" y datos sin winsorizar

El gráfico muestra que el Hurst móvil comienza en niveles claramente superiores a 0.55, donde se mantiene en rangos persistentemente elevados durante buena parte del periodo inicial y parece tender a corregirse en fases posteriores.

En los meses previos al conflicto de Gaza, el estadístico oscila en torno a valores comprendidos aproximadamente entre 0.57 y 0.61, lo que apunta a un comportamiento persistentemente estructurado en la serie de rendimientos del segmento tradicional. Tras este evento, se aprecia que el Hurst se incrementa y alcanza máximos cercanos o superiores a 0.70, manteniéndose en niveles elevados durante un periodo prolongado, coherente con un entorno en el que el shock geopolítico genera una reacción fuertemente correlacionada de los agentes.

A partir de 2025, la trayectoria del Hurst móvil cambia de signo. El estadístico desciende progresivamente, cruza el umbral de 0.5 y alcanza mínimos en torno a 0.40-0.45 en determinados intervalos, indicando la aparición de fases de antipersistencia o, en términos prácticos, de correcciones rápidas que revierten movimientos previos.

En el tramo final de la muestra, coincidiendo con el segundo evento, el Hurst comienza a recuperarse y se sitúa de nuevo en torno al umbral de 0.5 o ligeramente por encima, lo que sugiere un cierto reajuste del patrón de dependencia. En conjunto, este análisis pone de manifiesto que la eficiencia del segmento tradicional es claramente dependiente del régimen, intensificándose la memoria en torno a shocks geopolíticos y debilitándose hasta llegar a la antipersistencia local en fases posteriores de ajuste.

Evidencia de multifractalidad

Desde el punto de vista multifractal, la anchura del espectro estimada sobre los datos RAW ($\Delta\alpha = 0.390$) indica una heterogeneidad dinámica en la serie de rendimientos agregados. La Figura 6 muestra un espectro relativamente ancho, con un máximo alrededor de $\alpha \approx 0.54-0.56$ y colas que se extienden hacia valores inferiores y superiores, reflejando la coexistencia de distintos regímenes de volatilidad y dependencia.

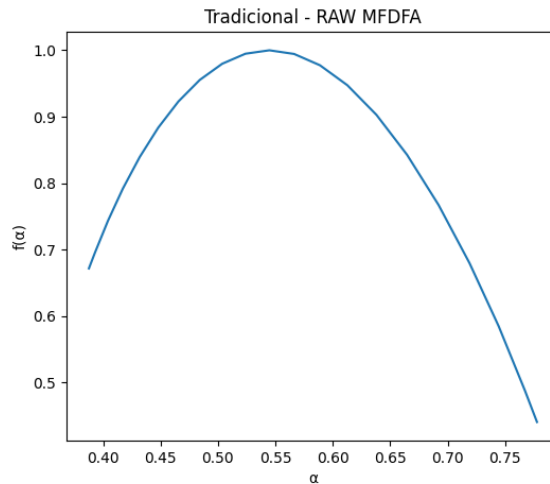


Figura 6: MFDFA con las 27 empresas "tradicionales" y datos sin winsorizar

La comparación de este resultado con las simulaciones de Monte Carlo refuerza la interpretación de una multifractalidad no trivial. El intervalo del 5-95% para $\Delta\alpha$ se sitúa en $[0.05748288, 0.19786548, 0.33300764]$, mientras que el valor empírico (0.390) se encuentra por encima del límite superior de la banda.

Esta posición relativa indica que la amplitud del espectro no puede atribuirse únicamente a la aleatoriedad inherente a un proceso nulo, sino que revela una estructura multifractal estadísticamente relevante. Desde la perspectiva financiera, ello implica que el segmento tradicional presenta una diversidad considerable de escalas temporales y comportamientos locales, con episodios de alta y baja volatilidad que no se ajustan a un patrón homogéneo de mercado eficiente.

Interpretación

Hemos podido observar que el valor medio de H se sitúa en la región de persistencia, con una posición dentro de las bandas de Monte Carlo. La dinámica temporal muestra que dicha persistencia se refuerza en torno al conflicto de Gaza, mientras que se debilita e

incluso da lugar a episodios de antipersistencia local en el periodo posterior, antes de recuperar niveles próximos a la aleatoriedad en el entorno del segundo evento geopolítico.

Por su parte, la amplitud del espectro multifractal, indica que la serie presenta una estructura interna compleja, caracterizada por la coexistencia de múltiples escalas y regímenes de volatilidad.

Desde la óptica de la hipótesis de mercado eficiente en su forma débil, estos resultados sugieren que el segmento tradicional no puede describirse como plenamente eficiente: la información histórica y el contexto macroeconómico siguen influyendo en la dinámica de los precios.

Análisis de robustez: winsorización de retornos

Para evaluar la sensibilidad de estos resultados a la presencia de observaciones extremas, se repite el ejercicio tras aplicar una *winsorización* de los retornos del segmento tradicional (datos WINSOR).

En términos de Hurst estático, el efecto es limitado, pero no trivial. El valor medio se incrementa de $H = 0.561$ a $H = 0.570$, manteniéndose en la región de persistencia. El nuevo intervalo de Monte Carlo, $[0.50399551, 0.5678117, 0.61856353]$, sitúa el estadístico empírico de nuevo ligeramente por encima del centro de la distribución nula y próximo al extremo superior, por lo que la conclusión de ineficiencia débil permanece inalterada.

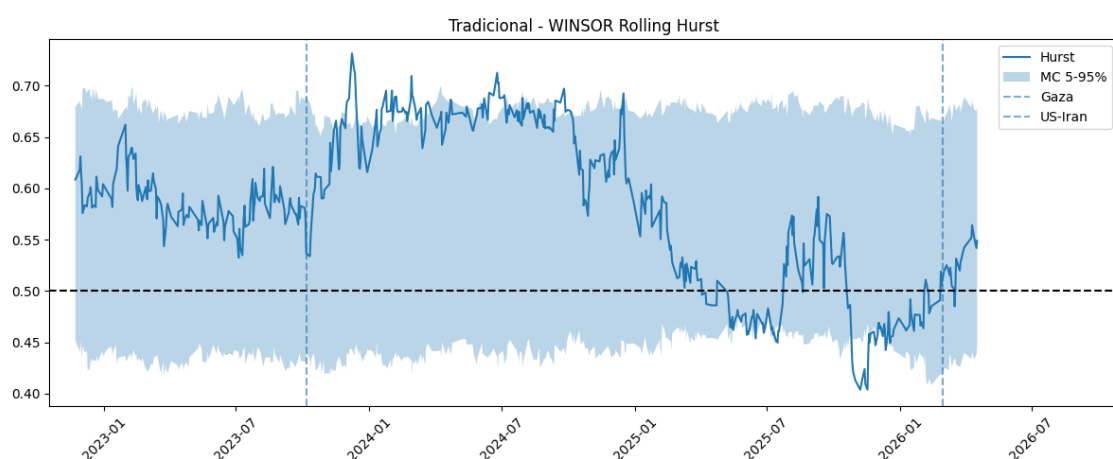


Figura 7: Rolling Hurst con las 27 empresas "tradicionales" y datos winsorizados

La Figura 7 muestra una trayectoria temporal muy similar a la obtenida con datos RAW, con fases de elevada persistencia en torno al conflicto de Gaza, descenso marcado por

debajo de 0.5 a partir de 2025 y recuperación parcial en el tramo final, en la vecindad del segundo evento. La *winsorización* suaviza algunas oscilaciones puntuales, pero no modifica el patrón de dependencia temporal ni la lectura cualitativa de la eficiencia.

En términos de multifractalidad, la *winsorización* introduce cambios moderados en la anchura del espectro. La estimación de $\Delta\alpha$ pasa de 0.390 (RAW) a 0.362 (WINSOR), lo que sugiere que una parte de la complejidad captada inicialmente estaba asociada a movimientos extremos en las colas de la distribución de rendimientos.

Sin embargo, incluso tras el tratamiento, el valor de $\Delta\alpha$ continúa superando el intervalo de Monte Carlo [0.08357889, 0.19606971, 0.34396671], de modo que la multifractalidad sigue siendo estadísticamente significativa. La Figura 8 muestra un espectro ligeramente más estrecho, pero con forma y posición del máximo muy similares a las del caso RAW, lo que indica que la estructura de escalas y regímenes de volatilidad se mantiene esencialmente intacta.

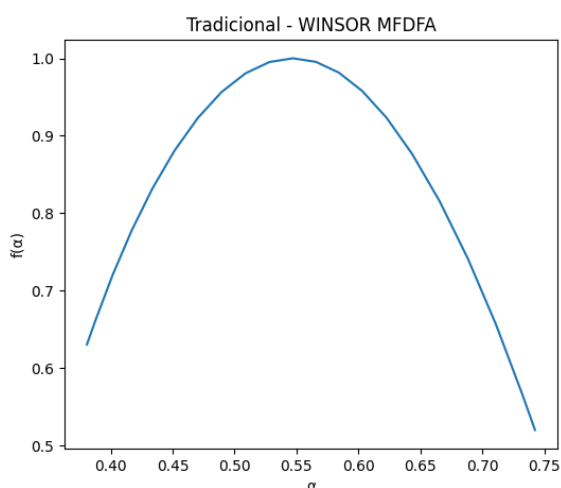


Figura 8: MFDFA con las 27 empresas "tradicionales" y datos winsorizados

En consecuencia, el tratamiento de valores extremos no altera las conclusiones fundamentales: el segmento tradicional del mercado del amoniaco continúa presentando una dinámica persistentemente ineficiente y multifractal, incluso cuando se controla por la influencia de observaciones extremas.

4.3 Resultados Estudio 3: “Pure players”

Hurst estático

El análisis del subgrupo de empresas “*pure players*” de amoniaco verde comienza con la estimación del estadístico de Hurst sobre la serie agregada de rendimientos sin tratamiento adicional (datos RAW).

El valor medio obtenido, $H = 0.517$, se sitúa muy próximo al umbral de 0.5 asociado a un comportamiento puramente aleatorio sin memoria, aunque con un ligero sesgo hacia la persistencia. Esta primera evidencia sugiere que, en promedio, este segmento del mercado se aproxima más a la eficiencia débil que los grupos global y tradicional, si bien los rendimientos no son completamente independientes en el tiempo.

La robustez de esta apreciación se contrasta nuevamente mediante simulación de Monte Carlo, donde el intervalo de confianza del 5-95% para H se encuentra en $[0.500309, 0.56245446, 0.62633722]$. En este caso el valor empírico se sitúa apenas por encima del extremo inferior de la banda y muy cerca del umbral de 0.5. Desde un punto de vista estadístico, el desplazamiento hacia la persistencia es mucho menos acusado que en los otros segmentos y el rechazo del paseo aleatorio es, en este caso, más matizado.

El submercado de *pure players* muestra, por tanto, un grado de ineficiencia débil relativamente moderado cuando se evalúa únicamente a través del Hurst medio.

Evolución temporal

La incorporación de la dimensión temporal mediante el Hurst en ventana móvil permite profundizar en esta caracterización. La Figura 9 representa la evolución del estadístico a lo largo del periodo muestral, incorporando la localización del conflicto de Gaza y de las tensiones entre Estados Unidos e Irán.

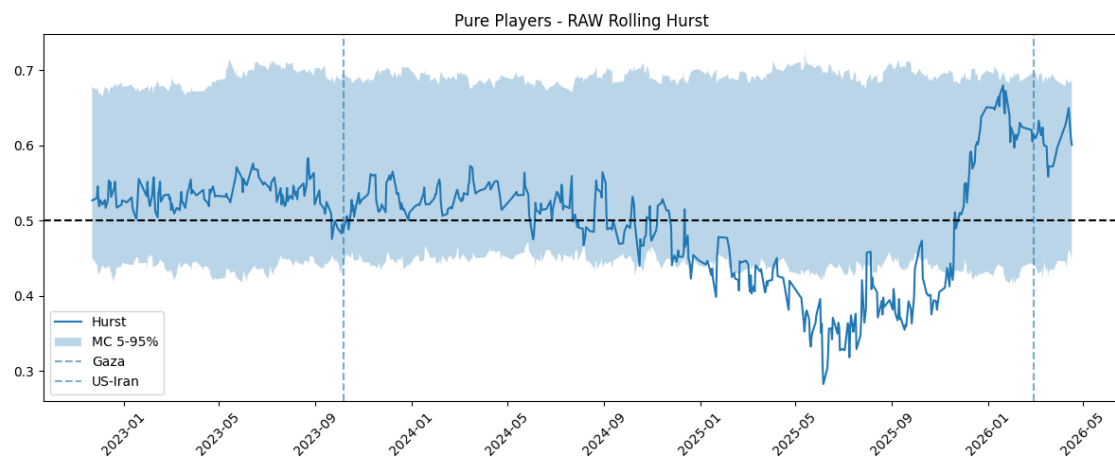


Figura 9: Rolling Hurst con las 3 empresas "pure players" y datos sin winsorizar

El gráfico muestra que, durante buena parte del periodo inicial, el Hurst móvil se mantiene en un entorno cercano a la eficiencia, con valores que oscilan ligeramente por encima de 0.5 y sin desviaciones extremas.

En los meses previos y posteriores al conflicto de Gaza, el estadístico se mueve aproximadamente en el rango 0.50-0.55, lo que indica un comportamiento cercano a la aleatoriedad, sin una persistencia marcada en la serie agregada de los *pure players*. A medida que avanza el horizonte temporal, especialmente a partir de 2024, se observa una tendencia descendente: el Hurst comienza a situarse por debajo de 0.5 y alcanza mínimos en torno a 0.30-0.35 en algunos tramos de 2025, revelando episodios de antipersistencia pronunciada. En estos intervalos, los movimientos de precio tienden a revertirse con rapidez, lo que puede interpretarse como fases de corrección intensa tras episodios previos de sobre-reacción.

En el tramo final de la muestra, coincidiendo con el segundo evento geopolítico, la trayectoria cambia de signo. El Hurst se incrementa de forma abrupta y alcanza niveles claramente persistentes, en torno a 0.60-0.65, antes de estabilizarse de nuevo en valores algo superiores a 0.5.

En conjunto, la evidencia de la ventana móvil pone de manifiesto que, aunque el Hurst medio sugiere una proximidad relativa a la eficiencia, el segmento verde experimenta alternancias marcadas entre episodios de antipersistencia y fases de elevada persistencia. La eficiencia, por tanto, no es una propiedad estable, sino fuertemente condicionada por cambios de régimen y shocks informativos.

Evidencia de multifractalidad

El análisis multifractal mediante MFDFA introduce un matiz crucial en la interpretación del comportamiento de los *pure players*. La anchura del espectro multifractal estimada sobre los datos RAW es $\Delta\alpha = 0.769$, valor sensiblemente superior al observado en el mercado global y en el segmento tradicional.

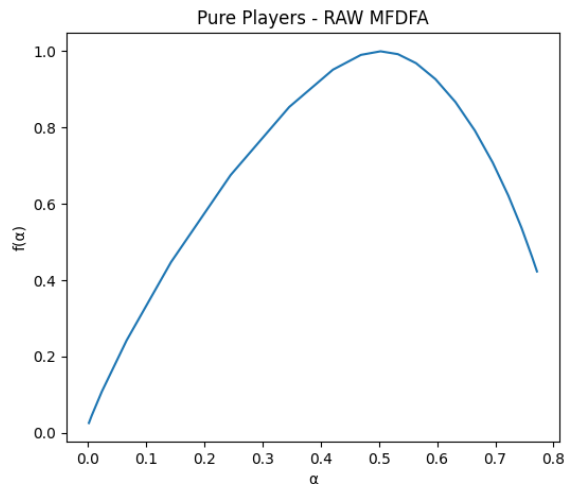


Figura 10: MFDFA con las 3 empresas "pure players" y datos sin winsorizar

La Figura 10 muestra un espectro muy ancho, con un máximo situado alrededor de $\alpha \approx 0.50$ y colas que se extienden desde valores muy bajos hasta niveles elevados, lo que refleja una heterogeneidad extrema en los comportamientos locales de la serie.

La comparación con las simulaciones de Monte Carlo resulta especialmente reveladora. El intervalo del 5-95% para $\Delta\alpha$ se sitúa en $[0.06279774, 0.20093455, 0.35919447]$, mientras que el valor empírico (0.769) se encuentra muy por encima del límite superior de la banda. Esta posición relativa indica que la amplitud del espectro no puede atribuirse a la aleatoriedad ni a efectos de muestra finita, sino que pone de manifiesto una multifractalidad extremadamente intensa.

Desde la perspectiva financiera, ello implica que el submercado de *pure players* presenta una diversidad muy acusada de escalas temporales y regímenes de volatilidad, compatible con un entorno de tecnología emergente y elevada incertidumbre, donde la reacción a la información es fuertemente heterogénea entre agentes y horizontes de inversión.

Interpretación

El valor de H del submercado se sitúa muy próximo a 0.5, de manera que el segmento se aproxima más a la eficiencia débil que el mercado global o el tradicional, aunque mantiene un ligero componente persistente.

La dinámica temporal muestra, sin embargo, que esta proximidad media oculta alternancias importantes al presentar periodos de comportamiento casi aleatorio, fases de antipersistencia pronunciada y episodios de fuerte persistencia concentrados en el tramo final del periodo. La amplitud extraordinaria del espectro multifractal confirma que la estructura interna de los rendimientos es la más compleja de los tres grupos analizados, con coexistencia de múltiples escalas y regímenes de volatilidad.

Desde la óptica de la hipótesis de mercado eficiente en su forma débil, estos resultados sugieren que el submercado de *pure players* no puede considerarse plenamente eficiente, pese a su Hurst medio relativamente moderado dado que la eficiencia es, de nuevo, dependiente del régimen y se ve acompañada de una complejidad multifractal muy acusada.

No obstante, se debe matizar que estos resultados deben analizarse con precaución, debido a la muestra tan reducida que este grupo presenta. Además, el comportamiento del grupo se ve fuertemente influenciado por los valores atípicos de Aker Horizons, como se ha visto durante el análisis estadístico. De esta forma, pese a que los resultados inclinan a considerar una profunda ineficiencia, se debe interpretar más como una característica propia de la juventud del segmento y no tanto como un patrón generalizable.

Análisis de robustez: winsorización de retornos

Al igual que con los grupos anteriores, se realiza una *winsorización* de los datos (datos WINSOR). En términos de Hurst estático, el efecto es prácticamente nulo porque el valor medio pasa de $H = 0.517$ a $H = 0.516$. El nuevo intervalo de Monte Carlo, [0.50526007, 0.56348626, 0.62822767], sitúa de nuevo el estadístico empírico cerca del extremo inferior de la banda, de modo que la lectura de “casi eficiencia” en términos medios se mantiene.

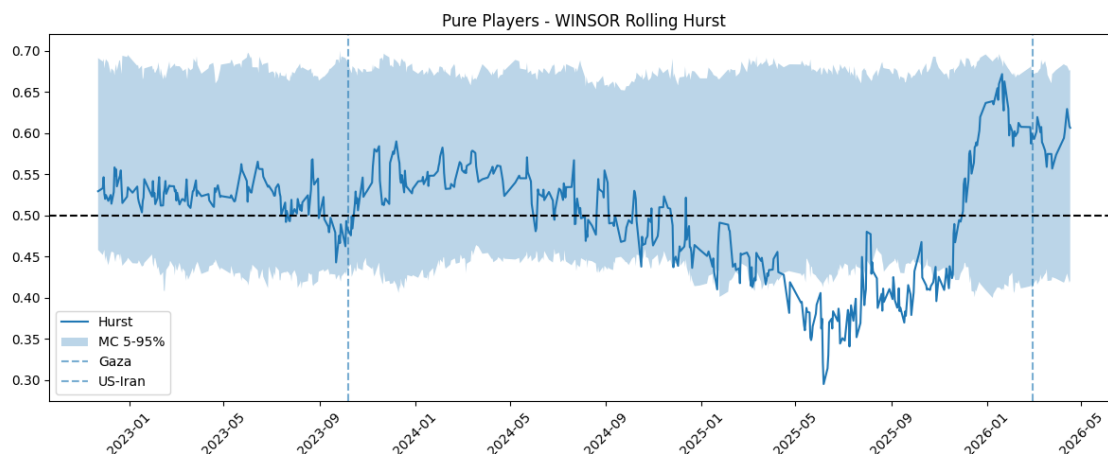


Figura 11: Rolling Hurst con las 3 empresas "pure players" y datos winsorizados

La Figura 11 muestra un patrón temporal muy similar al observado con datos RAW, con proximidad inicial a 0.5, caída hacia valores antipersistentes en torno a 2025 y repunte marcado hacia niveles persistentes en el tramo final, en correspondencia con el segundo evento geopolítico. Además, la *winsorización* apenas altera la estructura de la dependencia temporal, limitándose a suavizar pequeñas oscilaciones.

En cambio, el impacto sobre la multifractalidad si es importante desde el punto de vista cuantitativo, aunque no cualitativo. Tras la *winsorización*, la anchura del espectro multifractal se ve reducida de $\Delta\alpha = 0.769$ a $\Delta\alpha = 0.493$, lo que indica que una fracción relevante de la complejidad detectada en el análisis RAW estaba asociada a movimientos extremos de precio. No obstante, incluso con *winsorización*, el valor de $\Delta\alpha$ continúa superando de forma holgada el intervalo de Monte Carlo [0.05718366, 0.2029676, 0.37602302], de modo que la multifractalidad sigue siendo muy intensa y estadísticamente significativa.

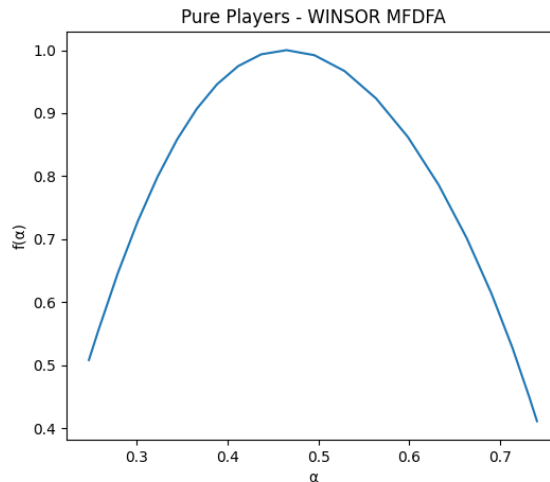


Figura 12: MFDFA con las 3 empresas "pure players" y datos winsorizados

La Figura 12 muestra un espectro todavía ancho y bien definido, con un máximo en torno a $\alpha \approx 0.45-0.50$ y colas prolongadas, aunque menos extremas que en el caso RAW.

En consecuencia, el tratamiento de observaciones extremas reduce la magnitud de la complejidad multifractal, pero no altera la conclusión central de que el submercado de *pure players* de amoniaco verde combina una eficiencia media relativamente elevada con la estructura interna más heterogénea y multifractal del conjunto de segmentos analizados.

4.4 Comparación de los 3 estudios realizados

En conjunto, los tres estudios muestran que el mercado del amoniaco se aleja de la eficiencia débil, pero con matices claros entre segmentos y con resultados que se mantienen cuando se controla por valores extremos.

En términos de datos RAW, el mercado global ($H \approx 0.580$) y el segmento tradicional ($H \approx 0.561$) presentan valores de Hurst claramente superiores a 0.5 y situados en la parte alta de sus bandas de Monte Carlo, lo que indica persistencia agregada y rechazo del paseo aleatorio. Tras la *winsorización*, estos valores apenas cambian ($H \approx 0.581$ y $H \approx 0.570$, respectivamente), de modo que la conclusión de ineficiencia débil es robusta al tratamiento de valores extremos.

Por el contrario, los *pure players* de amoniaco verde muestran un Hurst medio mucho más próximo al umbral tanto sin como con *winsorización* ($H \approx 0.517$ RAW, $H \approx 0.516$ WINSOR), siempre ubicándose cerca del extremo inferior de sus intervalos simulados,

de modo que la evidencia de memoria es cuantitativamente más moderada en este submercado.

La dinámica en ventana móvil revela que, en los tres grupos, la eficiencia es dependiente del régimen y se ve alterada por los shocks geopolíticos, y que este patrón persiste tras la *winsorización*.

Global y tradicional registran, tanto en RAW como en WINSOR, fases prolongadas de alta persistencia en torno al conflicto de Gaza, seguidas de episodios de corrección y, en algunos tramos, de antipersistencia en 2025, antes de una recuperación hacia valores próximos a 0.5 en el entorno del segundo evento. Los *pure players*, en cambio, se mantienen inicialmente cerca de 0.5 y sólo a partir de 2025 alternan episodios extremos de antipersistencia y persistencia intensa, un patrón que la *winsorización* apenas modifica más allá de suavizar ciertas oscilaciones locales. Esto sugiere que dicho segmento es, en media, más eficiente, pero también más inestable en términos de cambios de régimen, y que dicha inestabilidad no está impulsada únicamente por observaciones extremas.

Finalmente, los tres espectros multifractales presentan anchuras $\Delta\alpha$ significativamente superiores a las bandas de Monte Carlo tanto en RAW como en WINSOR, lo que confirma la existencia de multifractalidad no trivial en todos los segmentos.

La *winsorización* reduce la amplitud del espectro en los tres casos (por ejemplo, en el mercado global de $\Delta\alpha = 0.516$ a $\Delta\alpha = 0.392$, y en los *pure players* de $\Delta\alpha = 0.769$ a $\Delta\alpha = 0.493$), lo que indica que parte de la complejidad se debe a colas extremas, pero en ningún caso la anchura cae por debajo de los intervalos simulados, de modo que la multifractalidad sigue siendo estadísticamente significativa. La complejidad es claramente mayor en los *pure players* tanto antes como después de *winsorizar*, lo que indica que el submercado verde combina una eficiencia media relativamente elevada con la estructura interna más heterogénea y fragmentada del conjunto.

En síntesis, el amoniaco como activo no alcanza la eficiencia débil en ninguno de los tres niveles. La incorporación de la *winsorización* refuerza la conclusión de que la ineficiencia y la multifractalidad son propiedades robustas del mercado, aunque su grado y su forma difieren entre el segmento consolidado tradicional y el emergente de amoniaco verde.

5. Conclusiones

5.1 Principales hallazgos

El conjunto de resultados obtenidos permite afirmar que el mercado del amoniaco no cumple con la hipótesis de eficiencia débil y por ende se trata más de una ilusión que de una realidad. No obstante, se han observado diferencias claras entre el segmento global, el tradicional y los *pure players* de amoniaco verde que pueden cambiar esta percepción en el futuro.

En los datos originales (RAW), el mercado global presenta un exponente de Hurst medio $H \approx 0.580$, mientras que el segmento tradicional se sitúa en torno a $H \approx 0.561$. Ambos valores son claramente superiores a 0.5 y se ubican en la parte alta de sus respectivas bandas de Monte Carlo. La *winsorización* apenas ha modificado este diagnóstico, donde los valores pasan a $H \approx 0.581$ y $H \approx 0.570$, respectivamente, manteniéndose en la región de persistencia y confirmando que la ineficiencia débil no depende críticamente de retornos extremos. Por el contrario, los *pure players* muestran un perfil diferenciado. Tanto en RAW como en WINSOR el Hurst medio se mantiene muy próximo a 0.5 ($H \approx 0.517$ y $H \approx 0.516$), siempre cerca del extremo inferior de sus intervalos simulados, de modo que la evidencia de memoria de largo plazo es cuantitativamente más moderada en este submercado, no obstante, como se explica más adelante, no es suficiente para considerarlo eficiente.

La dinámica temporal, medida mediante Hurst en ventana móvil, confirma que la eficiencia es una propiedad claramente dependiente del régimen en los tres grupos. En los estudios global y tradicional, las curvas RAW y WINSOR muestran fases prolongadas de alta persistencia en torno al conflicto de Gaza (Hurst en el entorno 0.60-0.70), seguidas de episodios de corrección en 2025 en los que el estadístico converge hacia, e incluso cae por debajo de, 0.5, antes de una recuperación parcial en el entorno del segundo evento geopolítico (el cual no ha mostrado un efecto tan evidente por la proximidad temporal).

En los *pure players*, tanto con como sin *winsorización*, el Hurst se mantiene inicialmente cerca de 0.5, pero a partir de 2025 alterna episodios de antipersistencia pronunciada (valores en torno a 0.30-0.35) con una fase final de fuerte persistencia (0.60-0.65). El hecho de que la *winsorización* apenas altere la forma de estas trayectorias indica que los

cambios de régimen y la sensibilidad a los shocks geopolíticos son rasgos estructurales del mercado y no el resultado de unos pocos valores extremos aislados.

El análisis multifractal aporta una dimensión adicional clave. En los datos RAW, el mercado global presenta una anchura del espectro $\Delta\alpha \approx 0.516$ y el segmento tradicional $\Delta\alpha \approx 0.390$. Estos valores, superiores a los intervalos de Monte Carlo, confirman la presencia de multifractalidad no trivial. Tras la *winsorización*, ambas anchuras se reducen ($\Delta\alpha \approx 0.392$ y $\Delta\alpha \approx 0.362$), pero se mantienen por encima de las bandas simuladas, de modo que la complejidad multifractal persiste aunque atenuada. En los *pure players*, la situación es aún más marcada, el escenario RAW arroja un $\Delta\alpha \approx 0.769$, muy por encima de lo observado en los otros segmentos. Aunque aplicando la *winsorización* el valor se reduce a $\Delta\alpha \approx 0.493$, sigue superando holgadamente el límite superior de las bandas de Monte Carlo.

En conjunto, el mercado del amoniaco se caracteriza por una estructura multifractal robusta en todos sus segmentos, con una complejidad especialmente intensa en el submercado verde, aun cuando se eliminan los retornos más extremos.

5.2 Implicaciones para el mercado

Desde la perspectiva de la economía financiera, estos hallazgos tienen implicaciones relevantes para la interpretación del proceso de formación de precios y para la gestión de riesgos en el sector del amoniaco.

En primer lugar, la combinación de persistencia y multifractalidad en el mercado global y en el segmento tradicional indica que los shocks energéticos y geopolíticos generan fases de tendencia y regímenes de volatilidad bien definidos. Estas fases y regímenes son incompatibles con la suposición de rendimientos independientes e idénticamente distribuidos sobre la que se asienta la versión más simple de la EMH. El hecho de que los valores de Hurst se mantengan en zona persistente tras *winsorizar*, y de que la multifractalidad siga siendo estadísticamente significativa, sugiere que la ineficiencia y la complejidad no son artefactos de observaciones extremas puntuales, sino propiedades estructurales del mercado.

Para los inversores, esto implica que la dinámica de precios contiene patrones de dependencia y heterogeneidad que podrían ser explotables mediante estrategias dinámicas basadas en regímenes. No obstante, también significa que la evaluación del

riesgo debe apoyarse en modelos que incorporen explícitamente memoria de largo plazo, agrupamiento de la volatilidad y estructuras multifractales.

En segundo lugar, el comportamiento de los *pure players* de amoníaco verde ofrece una lectura específica para los activos ligados a la transición energética. El hecho de que su Hurst medio sea el más cercano a la eficiencia, combinado con la multifractalidad más intensa y con alternancias marcadas entre antipersistencia y persistencia, configura un perfil de mercado joven y relativamente “disciplinado” en promedio. Sin embargo, esta naturaleza es altamente inestable en términos de cambios de régimen. La reducción parcial de $\Delta\alpha$ tras *winsorizar* muestra que las colas extremas juegan un papel importante en esta complejidad. El mantenimiento de un espectro ancho y significativo sugiere que la volatilidad y la reacción a la información están fuertemente condicionadas por la heterogeneidad de agentes, horizontes y narrativas (tecnológicas, regulatorias y de financiación).

Para los reguladores y responsables de política energética, estos resultados apuntan a la necesidad de reforzar la transparencia, la calidad de la información y la profundidad de mercado en los activos vinculados al amoníaco verde, a fin de suavizar la respuesta a shocks y reducir la vulnerabilidad a episodios de sobre-reacción.

Mientras que para los emisores y financiadores de proyectos, la coexistencia de una eficiencia media relativamente elevada con una estructura multifractal muy intensa refuerza la importancia de una comunicación estratégica coherente y de una estructura financiera robusta frente a cambios abruptos de régimen.

5.3 Limitaciones del estudio

A pesar de aplicar una metodología contrastada, el trabajo presenta varias limitaciones que condicionan el alcance de las conclusiones.

En primer lugar, la longitud del periodo muestral viene determinada por la disponibilidad de datos. Algunas empresas, tanto tradicionales como *pure players*, contaban solo con datos a partir de finales del 2022, lo que ha restringido el horizonte temporal de análisis y ha podido afectar a la precisión de las estimaciones de H y $\Delta\alpha$, especialmente en los extremos de escala. Es por ello por lo que este estudio tiene una naturaleza más exploratoria que categórica, dado que los análisis R/S y MF DFA suelen aplicarse y devolver conclusiones robustas a series temporales más largas que la utilizada en el análisis realizado.

En segundo lugar, el estudio se centra exclusivamente en la forma débil de la eficiencia e incorpora únicamente información contenida en los precios agregados por grupos. No se ha considerado incluir variables de microestructura (volumen, spreads, profundidad de mercado) ni fundamentales (estructura de costes, *mix* de ingresos, indicadores regulatorios), lo que limita la capacidad para atribuir de manera causal la multifractalidad a factores específicos.

En tercer lugar, la muestra para la representación del segmento de amoníaco verde (Grupo 2) es escasa y cuenta además con una empresa con comportamiento atípico, por lo que los resultados mostrados para este submercado deben ser considerados con cautela y como una aproximación preliminar al subsector.

Finalmente, aunque la *winsorización* mejora la robustez frente a valores extremos, se ha aplicado un único esquema de recorte y un solo marco de MF DFA. La utilización de umbrales alternativos, métodos complementarios o variantes asimétricas de MF DFA podría ayudar a matizar y refinar las conclusiones.

5.4 Futuras líneas de investigación

Las limitaciones comentadas abren varias líneas de investigación futuras.

Una primera extensión natural puede consistir en ampliar el horizonte temporal y la frecuencia de los datos, incorporando, cuando sea posible, series intradiarias que permitan analizar la eficiencia y la multifractalidad a distintas escalas y en contextos macroeconómicos menos condicionados por shocks geopolíticos extremos. Esto será posible con el paso del tiempo, dado que la juventud del sector y la falta de algunos ETFs de referencia han provocado que el enfoque temporal haya sido corto (3.5 años) y se haya realizado sobre un conjunto de empresas seleccionadas a criterio del autor como las más representativas.

Una segunda línea podría ser desagregar el análisis a nivel de empresa e integrar variables de microestructura y fundamentales, para así construir indicadores de eficiencia y complejidad específicos por compañía y relacionarlos con características como tamaño, liquidez, estructura accionarial, intensidad de inversión en proyectos de amoníaco verde o exposición regulatoria.

Una tercera idea podría ser analizar una cartera con entradas y salidas de empresas, dado que el análisis realizado se ha centrado en una selección fija de empresas para un periodo

determinado, sin contemplar además la relevancia de estas al inicio del periodo de investigación.

Finalmente, podría resultar relevante comparar el comportamiento del amoniaco con otros vectores energéticos emergentes (hidrógeno, combustibles sintéticos, biometano), utilizando marcos multifractales y de eficiencia adaptativa, con el fin de determinar si el patrón observado es específico de este mercado o no.

6. Bibliografía

- Valera-Medina, A., Amer-Hatem, F., Azad, A. K., Dedoussi, I. C., de Joannon, M., Fernandes, R. X., Glarborg, P., Hashemi, H., He, X., Mashruk, S., McGowan, J., Medrano, J. A., Mokheimer, E. M. A., Ortiz-Prado, A., Roskilly, T., Shioji, M., Silvers, C., Tsolakis, A., & Zhang, Y. (2021). Review on ammonia as a potential fuel: From synthesis to economics. *Energy & Fuels*, 35(9), 6964-7029. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c03685>
- International Energy Agency (IEA). (2019). *The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities*. Report prepared for the G20, Japan. https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2019/06/the-future-of-hydrogen_2d59d5dd/1e0514c4-en.pdf
- International Fertilizer Association (IFA). (2024). *Public Summary: Short-Term Fertilizer Outlook 2024-2025*. https://www.fertilizer.org/wp-content/uploads/2025/02/2024_ifa_short_term_outlook_report.pdf
- Fama, E. F. (1965a). The behavior of stock-market prices. *The Journal of Business*, 38(1), 34-105. <http://www.e-m-h.org/Fama.pdf>
- Fama, E. F. (1970). Efficient capital markets: A review of theory and empirical work. *The Journal of Finance*, 25(2), 383-417. <http://efinance.org.cn/cn/fm/Efficient%20Capital%20Markets%20A%20Review%20of%20Theory%20and%20Empirical%20Work.pdf>
- Fama, E. F. (1965b). Random walks in stock-market prices. *Financial Analysts Journal*, 21(5), 55-59. <http://www.e-m-h.org/Fama1965a.pdf>
- Cont, R. (2001). Empirical properties of asset returns: Stylized facts and statistical issues. *Quantitative Finance*, 1(2), 223-236. <http://rama.cont.perso.math.cnrs.fr/pdf/empirical.pdf>
- Hurst, H. E. (1951). Long-term storage capacity of reservoirs. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 116, 770-799. https://ia903408.us.archive.org/4/items/sim_american-society-of-civil-engineers-proceedings_1951-03_77_3/sim_american-society-of-civil-engineers-proceedings_1951-03_77_3.pdf

- Weron, R. (2002). Estimating long-range dependence: Finite sample properties and confidence intervals. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 312(1-2), 285-299. https://alfa.im.pwr.edu.pl/~hugo/publ/RWeron02_PHYSA.pdf
- Kantelhardt, J. W., Zschiegner, S. A., Koscielny-Bunde, E., Havlin, S., Bunde, A., & Stanley, H. E. (2002). Multifractal detrended fluctuation analysis of nonstationary time series. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 316(1-4), 87-114. <https://arxiv.org/pdf/physics/0202070>
- Zhang, S., & Fang, W. (2021). Multifractal behaviors of stock indices and their ability to improve forecasting in a volatility clustering period of pandemics. *Complexity*, 2021, Article ID 5591040. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8392555/pdf/entropy-23-01018.pdf>
- Saâdaoui, F. (2023). Skewed multifractal scaling of stock markets during the COVID-19 pandemic. *Chaos, Solitons & Fractals*, 173, 113618. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10027953/pdf/main.pdf>
- Rizvi, S. A. R. (2014). An analysis of stock market efficiency: Developed versus Islamic. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 407, 86-99. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2014.04.003>
- Annis, A. A., & Lloyd, E. H. (1976). The expected value of the adjusted rescaled Hurst range of independent normal summands. *Biometrika*, 63(1), 111-116. <https://doi.org/10.1093/biomet/63.1.111>
- Hosking, J. R. M. (1981). Fractional differencing. *Biometrika*, 68(1), 165-176. <https://doi.org/10.1093/biomet/68.1.165>
- Corzo-Santamaría, T., Martin-Bujack, K., Portela, J., & Sáenz-Diez, R. (2022). Early market efficiency testing among hydrogen players. *International Review of Economics & Finance*, 82, 723-742. <https://doi.org/10.1016/j.iref.2022.06.020>
- Ihlen, E. A. F. (2012). Introduction to multifractal detrended fluctuation analysis in Matlab. *Frontiers in Physiology*, 3, 141. <https://doi.org/10.3389/fphys.2012.00141>

- Parlamento Europeo y Consejo. (2016). Directiva (UE) 2016/2284 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 14 de diciembre de 2016, sobre la reducción de las emisiones nacionales de determinados contaminantes atmosféricos, por la que se modifican las Directivas 2003/35/CE y 2004/35/CE y se deroga la Directiva 2001/81/CE. Diario Oficial de la Unión Europea. https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/emisiones-a-la-atmosfera/normativa-en-relacion-con-emisiones-a-la-atmosfera/iniciativas_europeas.html
- Parlamento Europeo y Consejo. (2024). Directiva (UE) 2024/2881 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 13 de noviembre de 2024, relativa a la calidad del aire ambiente y a un aire más limpio para Europa y por la que se derogan las Directivas 2004/107/CE y 2008/50/CE. Diario Oficial de la Unión Europea. <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2024-81722>
- Fortune Business Insights. (2024). Green Ammonia Market: Trends, Share & Industry Analysis. Fortune Business Insights. <https://www.fortunebusinessinsights.com/es/green-ammonia-market-105642>
- Ojelade, O. A., et al. (2023). Green ammonia production technologies: A review of practical progress. *Journal of Environmental Management*, 342, 118348. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118348>
- Torrellas, S., Lombardi, L., Mendecka, B., & Özdemir, E. (2025). Ammonia as a hydrogen carrier: Energetic assessment of processes integrated with fuel cells for power generation. *Energy & Fuels*, 39(5), 2843-2853. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.4c04626>
- Tan, X., Sang, Y., & co-authors. (2024). Ammonia as a green carbon-free fuel: A pathway to the sustainable energy economy. *ACS Energy Letters*, 9, 5120-5136. <https://doi.org/10.1021/acsenerylett.4c02288>
- Kumar, L., & Sleiti, A. (2024). Systematic review on ammonia as a sustainable fuel for combustion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 193, 113141. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114699>

- Negro, V., Noussan, M., & Chiamonti, D. (2023). The potential role of ammonia for hydrogen storage and transport: A critical review of challenges and opportunities. *Energies*, 16(17), 6192. <https://doi.org/10.3390/en16176192>
- Zamfirescu, C., & Dincer, I. (2009). Ammonia as a green fuel and hydrogen source for vehicular applications. *Fuel Processing Technology*, 90(5), 729-737. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.02.004>
- Nadarajah, S., & Chu, J. (2017). On the inefficiency of Bitcoin. *Economics Letters*, 150, 6-9. <https://doi.org/10.1016/j.econlet.2016.10.033>
- Wang, Y., Wei, Y., & Wu, C. (2011). Analysis of the efficiency and multifractality of gold markets based on multifractal detrended fluctuation analysis. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 390(5), 817-827. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2010.11.002>
- Mandelbrot, B. B., & Wallis, J. R. (1969). Robustness of the rescaled range R/S in the measurement of noncyclic long-run statistical dependence. *Water Resources Research*, 5(5), 967-988. <https://doi.org/10.1029/WR005i005p00967>
- Lo, A. W., & MacKinlay, A. C. (1988). Stock market prices do not follow random walks: Evidence from a simple specification test. *The Review of Financial Studies*, 1(1), 41-66. <https://doi.org/10.1093/rfs/1.1.41>
- Ceballos, R. F., & Largo, F. F. (2017). On the estimation of the Hurst exponent using adjusted rescaled range analysis, detrended fluctuation analysis and variance-time plot. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1805.08931>
- U.S. Geological Survey. (2023). *Mineral commodity summaries 2023 – Nitrogen (fixed) – Ammonia*. U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.5066/P9WCYUI6>
- Statista. (2025). *Global ammonia production in 2025*. Statista. <https://www.statista.com/statistics/1266244/global-ammonia-production-by-country/>
- International Energy Agency. (2022). *Gas Market Report, Q3-2022*. International Energy Agency. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c7e74868-30fd-440c-a616-488215894356/GasMarketReport,Q3-2022.pdf>

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC).
(2023). *Supplementary information: Green ammonia production (Methodological
tool PMM006)*. UNFCCC.
[https://unfccc.int/sites/default/files/resource/A6.4._PMM006_Supplementary_Inf
ormation.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/A6.4._PMM006_Supplementary_Information.pdf)

7. Anexos

Es importante mencionar que para la ejecución de estos archivos Python se ha utilizado la herramienta VS Code y se ha generado un entorno de ejecución exclusivo para este trabajo donde se ha usado la versión 3.11.14. Además, en los códigos compartidos no se muestran las rutas completas del archivo .csv porque se generó una carpeta específica sobre la que VS Code podía trabajar, generando y tomando las fuentes de esta.

Anexo I: Descarga datos empresas.py

```
import yfinance as yf
import pandas as pd

tickers = ["CF", "YAR.OL", "NTR", "OCI.AS", "MOS", "UAN", "LXU",
"ORI.AX", "COROMANDEL.NS",
"BAS.DE", "HUN", "AKE.PA", "CLN.SW", "SDF.DE", "IPI", "BG",
"4005.T", "ICL",
"ATT.WA", "KEMIRA.HE", "GAIL.NS", "TATACHEM.NS",
"CHAMBLFERT.NS",
"4183.T", "4188.T", "3407.T", "1866.HK",
"NEL.OL", "ITM.L", "AKH.OL"]

prices = pd.DataFrame()

for tk in tickers:
    print(f"Descargando {tk}")

    df = yf.download(tk, period="5y", progress=False)

    if df is None or df.empty or "Close" not in df.columns:
        print(f"Error con {tk}")
        continue

    prices[tk] = df["Close"]

prices = prices.sort_index()

prices.to_csv("precios_wide.csv")

print("CSV correcto generado")
```

Anexo II: Estadísticas rendimientos.py

```
import pandas as pd
import numpy as np
from scipy import stats

df_precios = pd.read_csv('precios_wide.csv', index_col=0,
parse_dates=True)

tickers_tradicional = ["CF", "YAR.OL", "NTR", "OCI.AS", "MOS",
"UAN", "LXU", "ORI.AX", "COROMANDEL.NS",
"BAS.DE", "HUN", "AKE.PA", "CLN.SW", "SDF.DE", "IPI", "BG",
"4005.T", "ICL",
"ATT.WA", "KEMIRA.HE", "GAIL.NS", "TATACHEM.NS",
"CHAMBLFERT.NS",
"4183.T", "4188.T", "3407.T", "1866.HK"]

tickers_pure_players = ["NEL.OL", "ITM.L", "AKH.OL"]

def calcular_estadisticas_grupo(df_precios, tickers,
nombre_archivo):
    resultados = []

    for ticker in tickers:
        if ticker not in df_precios.columns:
            print(f"Advertencia: {ticker} no encontrado en
datos")
            continue

        precios = df_precios[ticker].dropna()
        rendimientos_log = np.log(precios /
precios.shift(1)).dropna()

        resultados.append({
            'Empresa': ticker,
            'Media': rendimientos_log.mean(),
            'Desviación Típica': rendimientos_log.std(),
            'Asimetría': stats.skew(rendimientos_log),
            'Curtosis': stats.kurtosis(rendimientos_log),
        })

    df_stats = pd.DataFrame(resultados)

    fila_promedio = {
        'Empresa': 'PROMEDIO',
        'Media': df_stats['Media'].mean(),
        'Desviación Típica': df_stats['Desviación
Típica'].mean(),
        'Asimetría': df_stats['Asimetría'].mean(),
        'Curtosis': df_stats['Curtosis'].mean(),
    }

    df_stats = pd.concat([df_stats,
pd.DataFrame([fila_promedio])], ignore_index=True)
```

```
df_stats.to_csv(f'{nombre_archivo}.csv', index=False,
encoding='utf-8-sig')

print(f"\nTABLA: {nombre_archivo}")
print(df_stats.to_string(index=False))

return df_stats

df_tradicional = calcular_estadisticas_grupo(df_precios,
tickers_tradicional, 'estadisticas_tradicional')

df_pure_players = calcular_estadisticas_grupo(df_precios,
tickers_pure_players, 'estadisticas_pure_players')

print("\nARCHIVOS GENERADOS:")
print(" CSV:")
print(" - estadisticas_tradicional.csv")
print(" - estadisticas_pure_players.csv")
```

Anexo III: Análisis de datos.py

```
# 0. LIBRERÍAS

import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from numpy.polynomial.polynomial import polyfit, polyval

# 1. CARGA DE DATOS

prices = pd.read_csv("precios_wide.csv", index_col=0,
parse_dates=True)
prices = prices.sort_index()
prices = prices.dropna(axis=1, how="all")

# 2. PREPROCESAMIENTO (RAW vs WINSOR)

def compute_returns(prices, winsorize=False):
    returns = np.log(prices / prices.shift(1)).dropna()

    if winsorize:
        returns = returns.clip(
            lower=returns.quantile(0.01),
            upper=returns.quantile(0.99),
            axis=1
        )
    return returns

returns_raw = compute_returns(prices, winsorize=False)
returns_winsor = compute_returns(prices, winsorize=True)

print("\nRAW:", returns_raw.shape)
print("WINSOR:", returns_winsor.shape)

# 3. GRUPOS

grupo2 = ["NEL.OL", "ITM.L", "AKH.OL"]
grupo1 = [c for c in returns_raw.columns if c not in grupo2]

groups = {
    "Global": list(returns_raw.columns),
    "Tradicional": grupo1,
    "Pure Players": grupo2
}

# 4. AGREGACIÓN

def aggregate_group(returns, tickers):
    sub = returns[tickers].dropna()
    return sub.mean(axis=1)

# 5. R/S HURST

def rs_analysis(series, scales):
    N = len(series)
```

```

rs_vals = []

for n in scales:
    M = N // n
    rs = []

    for i in range(M):
        block = series[i*n:(i+1)*n]
        mean = np.mean(block)
        std = np.std(block)

        if std == 0:
            continue

        Y = np.cumsum(block - mean)
        R = np.max(Y) - np.min(Y)
        rs.append(R / std)

    if len(rs) > 0:
        rs_vals.append(np.mean(rs))

scales = np.array(scales[:len(rs_vals)])
rs_vals = np.array(rs_vals)

slope, _ = np.polyfit(np.log(scales), np.log(rs_vals), 1)
return slope

```

6. ROLLING HURST

```

def rolling_hurst(series, window, scales):
    H, dates = [], []

    for i in range(window, len(series)):
        sub = series.iloc[i-window:i]
        H.append(rs_analysis(sub.values, scales))
        dates.append(series.index[i])

    return pd.Series(H, index=dates)

```

7. MFDFA

```

def mfdfa(series, scales, q_vals, m=1):
    series = series - np.mean(series)
    Y = np.cumsum(series)
    N = len(Y)

    Fq = np.zeros((len(q_vals), len(scales)))

    for si, s in enumerate(scales):
        Ns = N // s
        segments = []

        for v in range(Ns):
            seg = Y[v*s:(v+1)*s]
            x = np.arange(len(seg))
            coeffs = polyfit(x, seg, m)
            trend = polyval(x, coeffs)

```

```

        segments.append(np.mean((seg - trend)**2))

    for v in range(Ns):
        seg = Y[N-(v+1)*s:N-v*s]
        x = np.arange(len(seg))
        coeffs = polyfit(x, seg, m)
        trend = polyval(x, coeffs)
        segments.append(np.mean((seg - trend)**2))

    segments = np.array(segments)

    for qi, q in enumerate(q_vals):
        if q == 0:
            Fq[qi, si] =
np.exp(0.5*np.mean(np.log(segments)))
        else:
            Fq[qi, si] = (np.mean(segments**(q/2)))**(1/q)

    hq = []
    for qi in range(len(q_vals)):
        slope, _ = np.polyfit(np.log(scales), np.log(Fq[qi]), 1)
        hq.append(slope)

    hq = np.array(hq)
    tq = q_vals * hq - 1
    alpha = np.gradient(tq, q_vals)
    f_alpha = q_vals * alpha - tq
    delta_alpha = np.max(alpha) - np.min(alpha)

    return hq, alpha, f_alpha, delta_alpha

# 8. MONTE CARLO

def monte_carlo_hurst(length, scales, n_sim=300):
    H_vals = []
    for _ in range(n_sim):
        noise = np.random.normal(0,1,length)
        H_vals.append(rs_analysis(noise, scales))
    return np.percentile(H_vals, [5,50,95])

def monte_carlo_rolling(series, window, scales, n_sim=150):
    paths = []

    for _ in range(n_sim):
        noise = np.random.normal(0,1,len(series))
        noise_series = pd.Series(noise, index=series.index)
        paths.append(rolling_hurst(noise_series, window,
scales).values)

    paths = np.array(paths)
    return np.percentile(paths, 5, axis=0),
np.percentile(paths, 95, axis=0)

def monte_carlo_mfdfa(length, scales, q_vals, n_sim=150):
    deltas = []

```

```

for _ in range(n_sim):
    noise = np.random.normal(0,1,length)
    _,_,_,d = mfdfa(noise, scales, q_vals)
    deltas.append(d)
return np.percentile(deltas, [5,50,95])

# 9. EVENTOS

def add_events():
    events = {
        "Gaza": "2023-10-07",
        "US-Iran": "2026-02-28"
    }

    for name, date in events.items():
        plt.axvline(pd.to_datetime(date), linestyle='--',
alpha=0.6, label=name)

# 10. PLOT

def plot_rolling(H, low, up, title):
    plt.figure(figsize=(12,5))
    plt.plot(H.index, H.values, label="Hurst")
    plt.fill_between(H.index, low, up, alpha=0.3, label="MC 5-
95%")
    plt.axhline(0.5, linestyle='--', color='black')
    add_events()
    plt.title(title)
    plt.legend()
    plt.xticks(rotation=45)
    plt.tight_layout()
    plt.show()

def plot_mfdfa(alpha, f_alpha, title):
    plt.figure(figsize=(6,5))
    plt.plot(alpha, f_alpha)
    plt.title(title)
    plt.xlabel("α")
    plt.ylabel("f(α)")
    plt.show()

# 11. ANÁLISIS

def run_study(returns, tickers, window, scales, q_vals):

    series = aggregate_group(returns, tickers)

    H = rs_analysis(series.values, scales)
    H_ci = monte_carlo_hurst(len(series), scales)

    H_roll = rolling_hurst(series, window, scales)
    low, up = monte_carlo_rolling(series, window, scales)

    _, alpha, f_alpha, delta = mfdfa(series.values, scales,
q_vals)
    delta_ci = monte_carlo_mfdfa(len(series), scales, q_vals)

```

```

return {
    "H": H,
    "H_ci": H_ci,
    "H_roll": H_roll,
    "low": low,
    "up": up,
    "alpha": alpha,
    "f_alpha": f_alpha,
    "delta": delta,
    "delta_ci": delta_ci
}

# 12. EJECUCIÓN DOBLE

scales = [10,20,40,80,160]
q_vals = np.linspace(-5,5,21)
window = 250

results = {"RAW": {}, "WINSOR": {}}

for label, data in [("RAW", returns_raw), ("WINSOR",
returns_winsor)]:
    print(f"\n--- {label} ---")

    for name, tickers in groups.items():

        print(f"\n{name}")

        res = run_study(data, tickers, window, scales, q_vals)
        results[label][name] = res

        print(f"H = {res['H']:.3f}")
        print(f"H CI = {res['H_ci']}")
        print(f" $\Delta\alpha$  = {res['delta']:.3f}")
        print(f" $\Delta\alpha$  CI = {res['delta_ci']}")

        plot_rolling(
            res["H_roll"],
            res["low"],
            res["up"],
            f"{name} - {label} Rolling Hurst"
        )

        plot_mfdfa(
            res["alpha"],
            res["f_alpha"],
            f"{name} - {label} MF DFA"
        )

```