



UNIVERSIDAD PONTIFICIA DE COMILLAS - ICADE
FACULTAD DE CIENCIAS ECONÓMICAS
RELACIONES INTERNACIONALES

Análisis de los Mercados de Carbono y su Evolución: El Caso del Sistema de Comercio de Emisiones de la Unión Europea (EU ETS)

Por: Marta Vara Rodriguez

Anteproyecto de trabajo final de grado presentado a la Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales de la Universidad Pontificia de Comillas como parte de los requisitos para optar al título de Relaciones Internacionales y Business Analytics.

Realizado bajo la tutoría del profesor
Patrizio Lecca

Abril, 2025

Resumen

El presente trabajo analiza el papel de los mercados de carbono en la transición hacia una economía baja en emisiones, centrándose en su evolución, estructura y digitalización. A través de un enfoque mixto, se combina una revisión documental del marco regulatorio y tecnológico con un análisis empírico del EU ETS mediante modelos econométricos en Python. Los resultados muestran que el precio del carbono ha sido una señal efectiva para reducir emisiones y orientar inversiones. Asimismo, se exploran casos de innovación digital como KlimaDAO y Toucan Protocol, que ilustran el potencial de la tecnología blockchain para transformar estos mercados. Se concluye con recomendaciones para reforzar la gobernanza, ampliar la interoperabilidad y mejorar la integridad ambiental.

Palabras clave: mercado de carbono, EU ETS, blockchain, clima, econometría, gobernanza.

Abstract

This thesis analyzes the role of carbon markets in the transition to a low-carbon economy, focusing on their evolution, structure, and digital transformation. Using a mixed-methods approach, it combines a documentary review of regulatory and technological frameworks with an econometric analysis of the EU ETS, implemented in Python. The results show that carbon pricing has acted as an effective signal for emission reductions and green investments. The study also explores digital innovation cases such as KlimaDAO and Toucan Protocol, highlighting the potential of blockchain technology to reshape these markets. The work concludes with policy recommendations to enhance governance, interoperability, and environmental integrity.

Keywords: carbon market, EU ETS, blockchain, climate, econometrics, governance.

Índice General

| | |
|--|------------|
| Resumen | II |
| Abstract | II |
| Índice General | III |
| Índice de Tablas | VI |
| Índice de Figuras | VII |
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1. Revisión de literatura | 1 |
| 1.1.1. Fundamentos teóricos de los mercados de carbono | 1 |
| 1.1.2. Evaluaciones empíricas de mercados existentes | 1 |
| 1.1.3. Tendencias emergentes: innovación y digitalización | 2 |
| 1.1.4. Aportes del presente trabajo | 2 |
| 1.2. Motivación | 2 |
| 1.2.1. Motivación jurídica | 3 |
| 1.2.2. Motivación económica | 3 |
| 1.2.3. Motivación medioambiental | 3 |
| 1.2.4. Motivación social | 4 |
| 1.3. Objetivos | 4 |
| 1.4. Metodología | 4 |
| 1.5. Recursos | 6 |
| 2. CONTEXTO HISTÓRICO Y EVOLUCIÓN DE LOS MERCADOS | 7 |
| 2.1. Definición de Mercados de Carbono | 7 |
| 2.2. Tipos de Mercados de Carbono | 8 |
| 2.2.1. Mercados de Cumplimiento | 8 |
| 2.2.2. Mercados Voluntarios de Carbono (MVC) | 9 |
| 2.3. Marco Regulatorio y Acuerdos Internacionales | 9 |
| 2.3.1. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) | 10 |
| 2.3.2. Protocolo de Kioto y el Mercado de Carbono | 11 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 2.3.3. | Acuerdo de París y las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC) | 13 |
| 2.4. | Evolución de las Emisiones Globales de CO ₂ y Justificación de los Mercados de Carbono | 14 |
| 2.4.1. | Evolución Histórica de las Emisiones Globales de CO ₂ | 14 |
| 2.4.2. | Distribución Regional de las Emisiones de CO ₂ | 16 |
| 2.4.3. | Emisiones Per Cápita | 18 |
| 2.4.4. | Justificación de los Mercados de Carbono | 20 |
| 3. | HUELLA DE CARBONO | 23 |
| 3.1. | Definición de huella de carbono | 23 |
| 3.2. | Tipos de huella de carbono | 23 |
| 3.2.1. | Huella de carbono de una organización | 23 |
| 3.2.2. | Huella de carbono de producto | 24 |
| 3.2.3. | Huella de carbono personal | 25 |
| 3.3. | Medición de la Huella de Carbono | 25 |
| 3.3.1. | Evaluación del Ciclo de Vida (ACV) y Métodos de Cálculo | 25 |
| 3.3.2. | Factores y Complejidad en la Medición | 26 |
| 3.3.3. | Herramientas para el Cálculo de la Huella de Carbono | 26 |
| 3.3.4. | Importancia de la Medición de la Huella de Carbono | 27 |
| 3.4. | Tipos de alcance en la medición de la huella de carbono | 27 |
| 3.4.1. | Alcance 1: Emisiones Directas de GEI | 28 |
| 3.4.2. | Alcance 2: Emisiones Indirectas de GEI Relacionadas con la Energía | 28 |
| 3.4.3. | Alcance 3: Otras Emisiones Indirectas de GEI | 28 |
| 4. | ANÁLISIS DE MERCADOS DE CARBONO EXISTENTES | 31 |
| 4.1. | Tamaño y Estructura del Mercado de Créditos de Carbono Regulado | 31 |
| 4.1.1. | Cobertura de Emisiones de los Mercados de Carbono | 31 |
| 4.1.2. | Distribución Geográfica de los Mecanismos de Precio al Carbono | 33 |
| 4.1.3. | Precios del Carbono en los Mercados Regulados | 34 |
| 4.1.4. | Evolución histórica y reciente del mercado voluntario de carbono | 37 |
| 4.1.5. | Proporción del mercado voluntario en relación con el mercado total | 38 |
| 4.2. | Tamaño y Estructura del Mercado de Créditos de Carbono Voluntario | 39 |
| 5. | SISTEMA DE EMISIONES DE LA UE (EU ETS) | 42 |
| 5.1. | Estructura y Funcionamiento del EU ETS | 42 |
| 5.2. | Evolución del Precio del Carbono en el EU ETS | 43 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 5.3. | Análisis Económico del Mercado EU ETS | 44 |
| 5.3.1. | Análisis Exploratorio de las Variables | 45 |
| 5.3.2. | Análisis de Componentes Principales (PCA) | 48 |
| 5.3.3. | Modelo Econométrico OLS | 51 |
| 5.3.4. | Conclusiones del Análisis Económico | 57 |
| 6. | INNOVACIÓN DIGITAL EN LOS MERCADOS DE CARBONO | 59 |
| 6.1. | Infraestructura Digital para la Gestión de Mercados de Carbono | 59 |
| 6.2. | Tecnologías Emergentes: Cadena de Bloques y Sistemas MNV (Medición, Notificación y Verificación) | 60 |
| 6.2.1. | Aplicaciones de blockchain en los mercados de carbono | 60 |
| 6.2.2. | Sistemas MNV (Medición, Notificación y Verificación) digitales | 62 |
| 6.3. | Visión Hacia un Mercado de Carbono Digitalizado Global | 63 |
| 6.3.1. | Bases normativas: el Artículo 6 del Acuerdo de París | 63 |
| 6.3.2. | Plataformas de referencia: CADT y Climate Warehouse | 64 |
| 6.3.3. | Iniciativas multilaterales y colaboraciones público-privadas | 64 |
| 6.3.4. | Retos para la creación de un mercado global digital | 64 |
| 7. | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 66 |
| 7.1. | Conclusiones Principales | 66 |
| 7.2. | Recomendaciones para el Desarrollo de Mercados de Carbono | 67 |
| 7.3. | Futuras Líneas de Investigación | 67 |
| | Referencias Bibliográficas | 69 |
| | Anexos | 74 |

Índice de Tablas

| | | |
|----|---|----|
| 1. | Análisis de Multicolinealidad: Factores VIF | 48 |
| 2. | Matriz de Loadings - Composición de las Componentes Principales. Fuente: Elaboración propia. | 49 |
| 3. | Resultados de los Modelos de Regresión OLS | 53 |

Índice de Figuras

| | | |
|-----|--|----|
| 1. | Países con sistemas de comercio de emisiones (ETS) en 2022. El gráfico muestra los países que han implementado o están en proceso de implementación de un sistema ETS como herramienta para limitar sus emisiones de gases de efecto invernadero. Fuente: Our World in Data [1]. | 11 |
| 2. | Evolución histórica de las emisiones globales de CO ₂ desde 1750 hasta 2023. Las emisiones han aumentado de forma exponencial, impulsadas principalmente por la quema de combustibles fósiles, la deforestación y la industrialización. Fuente: Our World in Data [1]. | 15 |
| 3. | Emisiones de CO ₂ por región. Fuente: Our World in Data [2]. | 16 |
| 4. | Varianza geográfica de las emisiones de CO ₂ entre 1970 y 2019. Fuente: James y Menzies [3]. | 17 |
| 5. | Emisiones de CO ₂ per cápita por país. Fuente: Our World in Data [1]. | 18 |
| 6. | Relación entre las emisiones de CO ₂ per cápita y el Índice de Capital Humano por región. Fuente: Elaboración propia. | 19 |
| 7. | Relación entre el Índice de Desarrollo Humano (HCI) y las emisiones de CO ₂ per cápita. Fuente: Elaboración propia. | 20 |
| 8. | Clasificación de los alcances en la medición de la huella de carbono: directo e indirecto. Fuente: Adaptado de CSR Consulting y otras fuentes [4, 5]. | 29 |
| 9. | Cobertura de emisiones de los principales mecanismos de cumplimiento a nivel mundial. El gráfico permite observar que actualmente un 24 % de las emisiones globales de GEI están cubiertas por mecanismos de mercado, donde destacan los sistemas ETS (19 %) frente a los impuestos al carbono (6 %). Además, se aprecia que los países con mayor nivel de ingresos son los que cuentan con mayor cobertura de sus emisiones. Fuente: World Bank Carbon Pricing Dashboard [6]. | 33 |
| 10. | Mapa mundial de cobertura de emisiones, 2024. El mapa ilustra el grado de penetración de los mercados de carbono a nivel global, destacando especialmente Europa, China, Estados Unidos, Corea del Sur, Canadá y algunas regiones de Sudamérica y Oceanía. Fuente: World Bank Carbon Pricing Dashboard [6]. | 34 |
| 11. | Rango de precios del carbono a nivel mundial, 2024. Fuente: World Bank Carbon Pricing Dashboard [6]. | 35 |

| | | |
|-----|---|----|
| 12. | Mapa mundial de precios del carbono, 2024. El mapa muestra las diferencias regionales existentes en los precios aplicados a las emisiones de carbono, destacando que los precios más altos se localizan principalmente en Europa Occidental, Escandinavia y algunas regiones de Canadá, mientras que en América Latina, Asia y África los precios se mantienen en niveles más bajos. Fuente: World Bank Carbon Pricing Dashboard [6]. | 36 |
| 13. | Evolución del precio de los derechos de emisión en distintos mercados (2019-2023). Se observa un liderazgo del EU ETS en cuanto a precios, seguido del UK ETS y del NZ ETS, mientras que otros sistemas como California, Corea del Sur o China mantienen precios más bajos. Fuente: Iberdrola [7]. | 37 |
| 14. | Evolución del precio de los permisos de carbono (EU ETS) entre 2015 y 2025. Fuente: Trading Economics [8]. | 43 |
| 15. | Matriz de correlación entre variables relativas. Fuente: Elaboración propia. . . | 46 |
| 16. | Gráficos de dispersión entre variables relativas. Fuente: Elaboración propia. . . | 47 |
| 17. | Scree Plot - Varianza explicada acumulada por el PCA. Fuente: Elaboración propia. | 49 |
| 18. | Biplot - Relación entre Variables Originales y Componentes Principales. Fuente: Elaboración propia. | 50 |
| 19. | Cargas de las Variables en los Componentes Principales. Fuente: Elaboración propia. | 51 |
| 20. | Comparativa entre sistemas tradicionales y basados en blockchain para la comercialización de créditos de carbono. Fuente: <i>carboncredits.com</i> [9]. | 62 |

1 INTRODUCCIÓN

El cambio climático se ha consolidado como uno de los desafíos más urgentes del siglo XXI, no solo por sus implicaciones ambientales, sino también por sus repercusiones económicas, sociales y geopolíticas. En este contexto, los mercados de carbono han emergido como una de las herramientas más eficaces para incentivar la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), proporcionando señales de precio que orientan las decisiones económicas hacia una transición energética sostenible. Este trabajo analiza el funcionamiento, evolución e impacto de estos mecanismos, con especial atención al Sistema de Comercio de Emisiones de la Unión Europea (EU ETS) y al mercado voluntario de carbono, explorando también el papel que las tecnologías emergentes como blockchain pueden desempeñar en su digitalización.

1.1 Revisión de literatura

El estudio de los mercados de carbono ha generado un corpus académico sólido en las últimas dos décadas, abarcando dimensiones jurídicas, económicas y medioambientales. Esta sección sintetiza los principales enfoques teóricos y empíricos de la literatura, sirviendo como marco de referencia para el análisis posterior.

1.1.1 Fundamentos teóricos de los mercados de carbono

Desde un punto de vista económico, los mercados de carbono se enmarcan en la teoría de las externalidades negativas y el principio de “quien contamina paga” [10]. Diversos autores [11],[12] han argumentado que los mecanismos de mercado —como los ETS o los impuestos al carbono— permiten internalizar los costes sociales de la contaminación de forma más eficiente que los mandatos regulatorios.

Además, la literatura destaca la eficiencia dinámica de estos mercados: al establecer un precio al carbono, no solo se reduce la contaminación de forma costo-efectiva, sino que se incentiva la innovación tecnológica a largo plazo [12].

1.1.2 Evaluaciones empíricas de mercados existentes

Los estudios empíricos sobre el funcionamiento de los ETS se han centrado especialmente en el caso europeo. Autores como Martin et al. (2014) [13] han demostrado que el EU ETS ha logrado reducciones significativas en las emisiones industriales, especialmente tras la reforma

de la Fase III. Más recientemente, Bayer & Aklin (2020) [13] confirman que la subida sostenida de precios en el EU ETS ha generado señales claras para la inversión verde.

También existe literatura crítica sobre la efectividad ambiental del mercado voluntario, especialmente por la falta de integridad en ciertos proyectos forestales o la escasa transparencia en la trazabilidad de los créditos [14]. Esto ha generado una corriente reciente de investigación centrada en la gobernanza, la calidad del crédito y la integridad del reclamo climático [15].

1.1.3 Tendencias emergentes: innovación y digitalización

En los últimos años ha emergido una literatura incipiente sobre la digitalización de los mercados de carbono. Autores como Zhang, Chen y Yue (2021) [16] exploran el papel potencial de tecnologías blockchain y plataformas MRV digitales para resolver retos históricos del mercado: trazabilidad, transparencia y doble conteo. La economía regenerativa (ReFi) y el uso de tokens respaldados por créditos de carbono (como KlimaDAO o Moss Earth) son temas que han comenzado a atraer atención académica en la intersección entre sostenibilidad y finanzas descentralizadas. Autores como Schletz et al. (2023) [17] exploran cómo las tecnologías blockchain pueden habilitar una transición hacia sistemas financieros regenerativos que incentiven impactos ambientales positivos..

1.1.4 Aportes del presente trabajo

A diferencia de la literatura existente, que a menudo analiza los mercados de forma agregada, este trabajo se centra en un estudio de caso profundo del EU ETS, combinando una perspectiva jurídica y económica con un enfoque cuantitativo basado en datos. Además, se incorpora una visión prospectiva sobre el futuro digital de estos mercados, conectando la gobernanza tradicional con soluciones tecnológicas emergentes. Esto permite ofrecer una lectura integrada de los desafíos actuales y las oportunidades de evolución estructural del mercado de carbono europeo.

1.2 Motivación

El diseño e implementación de mercados de carbono surge como respuesta a la necesidad de establecer mecanismos eficaces y eficientes para combatir el cambio climático. En este contexto, los instrumentos de precio al carbono —como los sistemas de comercio de emisiones (ETS) o los impuestos al carbono— no solo representan herramientas técnicas de mitigación, sino que se insertan en un ecosistema más amplio de motivaciones jurídicas, económicas, medioambientales

y sociales. Analizar en profundidad estos incentivos permite comprender por qué los mercados de carbono han ganado relevancia en la agenda internacional y por qué resulta urgente su fortalecimiento y expansión.

1.2.1 Motivación jurídica

El auge de los mercados de carbono no puede entenderse sin el impulso normativo derivado de los acuerdos internacionales sobre cambio climático. La firma del Acuerdo de París en 2015 marcó un punto de inflexión al establecer un marco legal común para la acción climática global, incluyendo en su Artículo 6 mecanismos explícitos para el comercio de emisiones. Esta evolución ha dotado de legitimidad y previsibilidad a los mercados de carbono, facilitando su adopción por parte de gobiernos y su inclusión en estrategias climáticas nacionales. La progresiva armonización normativa y la creación de marcos de gobernanza más robustos constituyen pilares fundamentales para garantizar su integridad ambiental y financiera.

1.2.2 Motivación económica

Desde una perspectiva económica, los mercados de carbono permiten internalizar las externalidades negativas asociadas a las emisiones de gases de efecto invernadero, asignando un coste explícito a la contaminación. Esta señal de precio incentiva la innovación tecnológica y la eficiencia energética, generando ventajas comparativas para los sectores más limpios. Además, el volumen de ingresos generados a través de estos mecanismos es significativo: en 2024, los mercados de carbono superaron los \$100.000 millones en ingresos fiscales a nivel global [18], convirtiéndose en herramientas no solo ambientales, sino también fiscales y de política industrial.

1.2.3 Motivación medioambiental

El fundamento ambiental de los mercados de carbono es evidente: al limitar y reducir progresivamente las emisiones, contribuyen de forma directa a los objetivos del Acuerdo de París y al mantenimiento de los equilibrios climáticos globales. Además, permiten canalizar inversión hacia proyectos de alta adicionalidad climática, como la reforestación, la generación renovable o la captura y almacenamiento de carbono (CCS). Al establecer un marco predecible de incentivos, favorecen la descarbonización de sectores difíciles de abatir y promueven un cambio estructural en los modelos productivos.

1.2.4 Motivación social

Finalmente, los mercados de carbono tienen un potencial transformador desde el punto de vista social. La redistribución de recursos generados por subastas o impuestos puede destinarse a políticas de transición justa, apoyando a los trabajadores y regiones más afectadas por el cambio estructural hacia una economía baja en carbono. En el ámbito del mercado voluntario, los créditos de carbono permiten financiar proyectos con co-beneficios en salud, empleo o acceso a servicios básicos en países en desarrollo. Así, estos mercados también operan como catalizadores de justicia climática y desarrollo sostenible en contextos vulnerables.

1.3 Objetivos

Este trabajo persigue los siguientes objetivos:

- Analizar la evolución histórica y la arquitectura actual de los mercados de carbono, diferenciando entre sistemas regulados y voluntarios.
- Evaluar en profundidad el funcionamiento del EU ETS y su impacto económico mediante un análisis cuantitativo con modelos econométricos.
- Explorar el papel de las tecnologías digitales, como blockchain y los sistemas MRV, en la transformación e interoperabilidad de los mercados de carbono.
- Proponer recomendaciones para fortalecer la integridad, eficiencia y escalabilidad de estos mecanismos de mercado en el contexto de la acción climática global.

1.4 Metodología

La presente investigación adopta un enfoque mixto, combinando análisis cualitativo y cuantitativo con el objetivo de ofrecer una visión integral de los mercados de carbono, y en particular, del funcionamiento y eficacia del Sistema de Comercio de Emisiones de la Unión Europea (EU ETS).

Desde una perspectiva cualitativa, se ha llevado a cabo un análisis documental exhaustivo sobre el marco regulatorio, la evolución histórica de los mercados de carbono, sus principales estándares, actores implicados y mecanismos de gobernanza. Esta revisión permite contextualizar el surgimiento de los mercados voluntarios y regulados, así como identificar las dinámicas institucionales que los configuran.

A nivel cuantitativo, se ha desarrollado un análisis econométrico centrado exclusivamente en el mercado regulado del EU ETS. Esta elección responde a dos motivos principales: en primer lugar, el EU ETS constituye el sistema más consolidado, robusto y transparente a nivel global, y en segundo lugar, es el único que dispone de una base de datos homogénea, amplia y sistematizada para un análisis longitudinal de sus indicadores clave. Otros sistemas de comercio de emisiones, como los implementados en China, California o Corea del Sur, carecen aún de la accesibilidad y calidad de datos necesarios para un análisis empírico riguroso a largo plazo.

Para la elaboración del modelo econométrico se ha utilizado el lenguaje de programación Python, en combinación con librerías especializadas de análisis de datos ('pandas', 'statsmodels', 'matplotlib', 'sklearn', entre otras). Esta elección se justifica por la flexibilidad, replicabilidad y potencia computacional que ofrece esta herramienta frente a métodos más tradicionales.

Se ha optado por aplicar un modelo de regresión lineal múltiple (modelo OLS —Ordinary Least Squares—), con el objetivo de identificar los principales determinantes de las emisiones de CO₂ en la UE durante el periodo 2015–2023. El modelo permite estimar cómo varían las emisiones en función de variables macroeconómicas y energéticas como el PIB, la inversión fija bruta, la intensidad energética, la actividad laboral o el número de derechos de emisión asignados. La elección del OLS responde a su capacidad interpretativa, a su adecuación en contextos donde se desea identificar relaciones causales aproximadas, y a su fácil implementación para fines de análisis de política pública.

Sin embargo, dado que algunas de las variables presentan una alta correlación entre sí (por ejemplo, PIB e inversión), se ha aplicado previamente un Análisis de Componentes Principales (PCA) para reducir la multicolinealidad entre regresores. Esta técnica permite transformar el conjunto original de variables en un número reducido de componentes no correlacionados entre sí, conservando la mayor parte de la varianza explicativa del sistema. Además, el PCA facilita la interpretación de patrones subyacentes en los datos y permite obtener estimaciones más robustas y estables en el modelo OLS.

Adicionalmente, se ha realizado un análisis exploratorio de los datos históricos, con la finalidad de identificar tendencias y relaciones significativas entre las variables seleccionadas. Este análisis incluye visualizaciones temporales, normalización de valores y matrices de correlación, lo que permite comprender mejor el comportamiento agregado del mercado y establecer hipótesis fundamentadas.

En conjunto, la metodología permite no solo contextualizar el funcionamiento del EU ETS desde una óptica regulatoria y económica, sino también cuantificar el grado de influencia que determinadas variables tienen sobre las emisiones, aportando evidencia empírica que complementa

la discusión conceptual sobre la eficacia de los mercados de carbono.

1.5 Recursos

Los datos utilizados en este trabajo provienen de fuentes oficiales y bases de datos reconocidas, entre ellas:

- World Bank Carbon Pricing Dashboard
- European Environment Agency (EEA)
- Trading Economics
- Eurostat
- Our World in Data
- Informes de BloombergNEF, CarbonCredits.com, Iberdrola, y documentos académicos revisados por pares.

Además, se ha empleado software como Python para el análisis de datos y elaboración de modelos estadísticos, así como Overleaf para la redacción académica en \LaTeX .

2 CONTEXTO HISTÓRICO Y EVOLUCIÓN DE LOS MERCADOS

El cambio climático representa una de las mayores amenazas para la estabilidad del planeta y el bienestar de las futuras generaciones, dado que las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) han alcanzado niveles críticos [19]. Las concentraciones excesivas de CO₂ y otros GEI, generadas por la actividad humana, intensifican el efecto invernadero, elevan las temperaturas globales y provocan una serie de impactos ambientales, económicos y sociales [18]. Según la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, las emisiones globales de GEI podrían superar en un 58 % los niveles de 1990 para el año 2030, lo que enfatiza la urgencia de adoptar medidas efectivas para su reducción [18]. Ante este escenario, el Parlamento Europeo y otros organismos internacionales han declarado una emergencia climática, instando a los países y actores globales a actuar con celeridad [20].

Para estabilizar el aumento de la temperatura global, es fundamental alcanzar emisiones netas cero de dióxido de carbono, además de reducir drásticamente otros GEI como el metano (CH₄) [18]. En respuesta a esta problemática, los gobiernos han adoptado diversas políticas para limitar las emisiones de GEI, entre las que se destacan los mercados de carbono como una herramienta clave para mitigar el cambio climático [21]. Estos mercados proporcionan incentivos económicos que promueven la reducción de emisiones y facilitan la transición hacia economías bajas en carbono [20]. Los ingresos generados por la fijación de precios del carbono han alcanzado un récord de USD 100 mil millones en 2024, lo que subraya su relevancia en la agenda climática global [22]. Sin embargo, la falta de conciencia y transparencia, especialmente en proyectos de compensación de carbono, continúa siendo un desafío que impide la adopción generalizada de estas prácticas sostenibles [19].

2.1 Definición de Mercados de Carbono

Los mercados de carbono son instrumentos económicos clave en la lucha contra el cambio climático, ya que permiten la compraventa de créditos de carbono, cuyo objetivo es reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) [2]. Este sistema ofrece una estructura en la cual los Estados, las empresas y otras entidades pueden compensar sus emisiones invirtiendo en proyectos que reduzcan o capturen GEI, como la reforestación y la captura mecánica de carbono, promoviendo así el cumplimiento de las metas establecidas en compromisos internacionales como las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC) [21]. En términos prácticos, un crédito de carbono representa una tonelada de CO₂ equivalente que ha sido reducida, secuestrada o evitada, y su valor depende de la demanda y la efectividad de los proyectos en los que se invierte

[2].

El funcionamiento de los mercados de carbono se basa en la integración de los costos sociales y ambientales que resultan de las emisiones de GEI dentro de las actividades productivas [21]. A nivel internacional, estos mercados se han consolidado como un componente esencial en las políticas climáticas, incentivando la descarbonización en sectores con diferentes niveles de dependencia de los combustibles fósiles [7]. Además, estos mercados brindan una señal económica a los emisores y fomentan la inversión en tecnologías de bajas emisiones, promoviendo innovaciones que impulsan el crecimiento sostenible [7].

Los mercados de carbono no existen en una ubicación geográfica específica, sino que operan en un sistema virtual donde compradores y vendedores de créditos rara vez interactúan directamente [23]. A pesar de la complejidad que caracteriza a estos mercados, su estructura básica permite que actores diversos participen en la mitigación de emisiones, ofreciendo una vía para que gobiernos y comunidades gestionen sus compromisos ambientales de manera flexible y económicamente viable [23].

2.2 Tipos de Mercados de Carbono

Los mercados de carbono se dividen en dos categorías principales: mercados regulados y mercados voluntarios, ambos con enfoques y objetivos distintos para incentivar la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) [7].

2.2.1 Mercados de Cumplimiento

Los **mercados regulados**, también conocidos como sistemas de comercio de emisiones (ETS, por sus siglas en inglés), son estructuras obligatorias establecidas por autoridades gubernamentales o supranacionales que imponen límites específicos a las emisiones de CO₂ en ciertos sectores [23]. En estos mercados, se asignan "derechos de emisión" que permiten a las empresas emitir una cantidad determinada de CO₂. Las empresas que no utilizan toda su asignación pueden vender el excedente a otras que necesitan emitir más, generando un sistema de compra-venta basado en un límite general de emisiones [23]. Estos derechos de emisión, regulados por entidades gubernamentales, establecen un precio de mercado para el carbono y fomentan la reducción de emisiones de forma costo-efectiva, ya que las empresas pueden optar por implementar medidas de reducción internas o adquirir derechos en el mercado [7]. Ejemplos de estos sistemas incluyen el Sistema de Comercio de Emisiones de la Unión Europea y los sistemas nacionales en países como México y California [21].

2.2.2 Mercados Voluntarios de Carbono (MVC)

Por otro lado, los **mercados voluntarios de carbono** permiten que empresas, organizaciones y particulares participen en la compra y venta de créditos de carbono de manera no obligatoria, es decir, por elección propia [2]. En estos mercados, los créditos de carbono representan la reducción o captura de una tonelada de CO₂ o su equivalente en GEI, generados a través de proyectos que buscan mitigar el cambio climático, como la reforestación, la conservación de bosques y la energía renovable [21]. Los compradores en el mercado voluntario adquieren estos créditos para compensar sus emisiones como parte de estrategias de responsabilidad social o ambiciosos objetivos de descarbonización [7]. A diferencia de los mercados regulados, los créditos de carbono en el mercado voluntario pueden variar considerablemente en función del tipo de proyecto, la ubicación y los beneficios adicionales, por lo que es esencial que los compradores verifiquen la calidad de los créditos mediante estándares reconocidos [7].

Ambos tipos de mercado cumplen roles complementarios en la transición hacia una economía baja en carbono, proporcionando señales económicas que promueven la inversión en iniciativas sostenibles y tecnológicamente innovadoras [7].

2.3 Marco Regulatorio y Acuerdos Internacionales

El desarrollo de los mercados de carbono y los sistemas de comercio de emisiones no puede entenderse sin un análisis riguroso del marco regulatorio internacional que los sustenta. A lo largo de las últimas tres décadas, se han establecido diversos acuerdos multilaterales bajo el amparo de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), que han ido configurando una arquitectura global orientada a la mitigación del cambio climático. Desde la adopción de principios fundacionales en la CMNUCC hasta la implementación de compromisos vinculantes en el Protocolo de Kioto y la creación de mecanismos de cooperación internacional en el Acuerdo de París, estos instrumentos han definido los fundamentos jurídicos, institucionales y económicos que rigen la gobernanza climática actual. Esta sección analiza de forma progresiva los principales acuerdos internacionales que han impulsado la evolución y expansión de los mercados de carbono como herramienta clave para alcanzar los objetivos de descarbonización global.

2.3.1 Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC)

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), adoptada en 1992 durante la Cumbre de la Tierra en Río de Janeiro, fue uno de los primeros tratados internacionales destinados a abordar la problemática del cambio climático y sus efectos en el planeta. Este tratado entró en vigor en 1994 y ha sido ratificado por 197 países, lo que lo convierte en una de las convenciones más universales y ampliamente aceptadas [24]. El objetivo principal de la CMNUCC es estabilizar las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera para prevenir interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático, en un marco de tiempo que permita a los ecosistemas adaptarse de forma natural, evitando daños irreversibles y facilitando un desarrollo económico sostenible [2, 24].

Dentro de la CMNUCC se reconoce el "principio de responsabilidades comunes pero diferenciadas", estableciendo diferentes compromisos para los países en función de sus niveles de industrialización. Así, los países más desarrollados, incluidos en el Anexo I, asumieron la responsabilidad de liderar la reducción de GEI y establecer políticas para reducir sus emisiones a los niveles de 1990, como ejemplo de firmeza ante el cambio climático [2]. Por otro lado, los países del Anexo II, que también son miembros de la OCDE, deben ofrecer apoyo financiero a las naciones en desarrollo para ayudarlas en sus esfuerzos de mitigación y adaptación al cambio climático [2].

La CMNUCC sentó las bases para futuros acuerdos climáticos, como el Protocolo de Kioto y el Acuerdo de París, que amplían y concretan las metas y mecanismos necesarios para alcanzar los objetivos de reducción de emisiones [20]. Aunque en sus primeros años la CMNUCC no incluyó referencias específicas a los mercados de carbono, este concepto se desarrolló más adelante bajo el Protocolo de Kioto y el Acuerdo de París, como herramientas para incentivar la reducción de emisiones a través de mecanismos de mercado y cooperación internacional [20].

En este contexto, los sistemas de comercio de emisiones (ETS, por sus siglas en inglés) han surgido como un componente clave para alcanzar los objetivos de la CMNUCC y sus acuerdos posteriores. Estos sistemas permiten a los países y empresas limitar sus emisiones de CO₂ al establecer un precio al carbono, promoviendo reducciones donde sea más rentable y facilitando la transferencia de tecnologías limpias. El mapa en la Figura 1 ilustra la adopción de sistemas de comercio de emisiones a nivel global en 2022, destacando las regiones donde estos mecanismos ya están en funcionamiento.

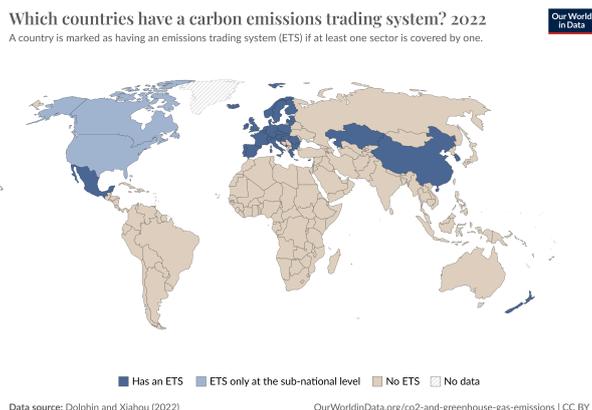


Figura 1: Países con sistemas de comercio de emisiones (ETS) en 2022. El gráfico muestra los países que han implementado o están en proceso de implementación de un sistema ETS como herramienta para limitar sus emisiones de gases de efecto invernadero. Fuente: Our World in Data [1].

La expansión de los ETS refleja un compromiso creciente con los principios establecidos por la CMNUCC, al tiempo que demuestra la necesidad de herramientas flexibles y escalables para abordar las emisiones globales. A medida que más países adoptan estos sistemas, se espera una mayor cooperación internacional y una integración más efectiva de los mercados de carbono, contribuyendo directamente a la meta de limitar el aumento de la temperatura global a 1.5 °C según lo estipulado en el Acuerdo de París [24, 20].

En resumen, la CMNUCC representa el marco regulatorio inicial que orienta los esfuerzos globales contra el cambio climático, estableciendo tanto principios como compromisos diferenciados que promueven la cooperación internacional. Los sistemas de comercio de emisiones, como se observa en la Figura 1, son un ejemplo tangible de cómo las herramientas económicas pueden complementar y fortalecer estos objetivos, asegurando la sostenibilidad ambiental y económica de las futuras generaciones [24, 3].

2.3.2 Protocolo de Kioto y el Mercado de Carbono

El **Protocolo de Kioto**, adoptado en 1997 y en vigor desde 2005, fue el primer acuerdo internacional que estableció compromisos legales específicos para que los países industrializados (conocidos como países del Anexo I) redujeran sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Este acuerdo se estructuró en torno a la necesidad de que las naciones más desarrolladas lideraran los esfuerzos globales para mitigar el cambio climático, dado su alto nivel de responsabilidad histórica en la acumulación de GEI [25]. Para los países del Anexo I, el Protocolo

impone una reducción promedio de emisiones de un 5,1 % en relación con los niveles de 1990, y en el caso de la Unión Europea, el objetivo específico era una reducción del 8 % durante el período de 2008-2012 [26].

El Protocolo de Kioto introdujo tres mecanismos de mercado, denominados "mecanismos de flexibilidad", que permiten a los países cumplir con sus objetivos de reducción de emisiones de manera más coste-efectiva. Estos mecanismos son: (i) el *comercio internacional de derechos de emisión*, que permite a los países del Anexo I intercambiar permisos de emisión entre sí; (ii) la *aplicación conjunta*, mediante la cual un país del Anexo I puede invertir en proyectos de reducción de GEI en otro país del mismo grupo y contabilizar los créditos generados para sus propios objetivos; y (iii) el *Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL)*, que permite a los países desarrollados financiar proyectos de reducción de emisiones en países en desarrollo y utilizar los créditos obtenidos para cumplir con sus compromisos [20]. Los mecanismos basados en proyectos, como la aplicación conjunta y el MDL, están diseñados para generar reducciones de emisiones a través de proyectos específicos que sean ambientalmente adicionales, y que puedan incrementar la absorción de GEI mediante sumideros [26].

Estos mecanismos estuvieron operativos durante los períodos de cumplimiento de 2008-2012 y 2013-2020, y su objetivo era promover la reducción de emisiones allí donde fuera más eficiente desde el punto de vista económico. Durante la cumbre de Glasgow en 2021, se acordó un período de transición para algunos de estos mecanismos, permitiendo que proyectos MDL registrados a partir de 2013 puedan ser reconocidos dentro del marco del Acuerdo de París hasta 2025, con salvaguardas específicas para mantener la integridad ambiental [2].

La inclusión de estos mecanismos de flexibilidad en el Protocolo de Kioto refleja la naturaleza global del cambio climático, ya que las reducciones de emisiones benefician al sistema climático sin importar dónde ocurran. Esto permite a los países que enfrentan altos costos de reducción interna optar por reducir emisiones en otros países de manera más económica [26]. Además, estos mecanismos no solo facilitan el cumplimiento de los compromisos de reducción de los países del Anexo I, sino que también buscan apoyar el desarrollo sostenible de los países en desarrollo a través de la transferencia de tecnologías limpias [26].

A través de estos mecanismos, el Protocolo de Kioto no solo permitió la creación del primer mercado global de carbono, sino que también promovió la cooperación internacional en proyectos de mitigación en países en desarrollo, incentivando la participación de estos países en los esfuerzos de reducción de GEI mediante la posibilidad de recibir financiamiento y vender créditos de carbono a las naciones desarrolladas [25]. En conjunto, estos esfuerzos pioneros marcaron el camino para los sistemas de mercado y la colaboración internacional en la lucha

contra el cambio climático.

En España, la Autoridad Nacional Designada (AND), creada mediante la Ley 1/2005, es responsable de autorizar proyectos MDL y AC en los que participe el país. La Subdirección General de Planificación Energética y Seguimiento actúa como representante en esta comisión interministerial, evaluando más del 70 % de los proyectos presentados [26].

2.3.3 Acuerdo de París y las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC)

El Acuerdo de París, adoptado en 2015 durante la 21ª Conferencia de las Partes (COP21) en París, establece un marco global para combatir el cambio climático mediante la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), la adaptación a sus efectos y la financiación climática para los países en desarrollo. Este acuerdo se sustenta en las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC, por sus siglas en inglés), las cuales representan los compromisos climáticos que cada país presenta de manera voluntaria para reducir sus emisiones y adaptarse al cambio climático [2].

Una de las características clave del Acuerdo de París es su dinamicidad, diseñada para garantizar un aumento progresivo en la ambición climática. Esto permite a los países reafirmar y actualizar periódicamente sus compromisos, fortaleciendo su agenda climática interna y promoviendo la implementación de medidas de mitigación [2]. Además, se reconoce que este marco debe ser inclusivo, incentivando la cooperación internacional para abordar las desigualdades en las capacidades tecnológicas y económicas de los países [2].

El Artículo 6 del Acuerdo de París es especialmente relevante, ya que establece los mecanismos para la cooperación internacional en la mitigación del cambio climático. Este artículo se divide en dos enfoques principales:

1. Transferencia internacional de resultados de mitigación (ITMOs): Según el Artículo 6.2, los países pueden participar de forma voluntaria en enfoques cooperativos que les permitan transferir y utilizar resultados de mitigación internacionalmente para cumplir con sus NDCs. Esto incluye la posibilidad de acuerdos bilaterales entre países para la compraventa de unidades de mitigación o la vinculación internacional de sistemas de comercio de emisiones (ETS, por sus siglas en inglés) [20].

2. Mecanismo internacional centralizado: El Artículo 6.4 crea un mecanismo regulado por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) que permite la generación e intercambio de unidades de reducción de emisiones, promoviendo el desarrollo sostenible. Este mecanismo se inspira en el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL)

del Protocolo de Kioto, pero incluye mejoras como la posibilidad de que los países anfitriones utilicen los créditos generados para sus propios objetivos climáticos o para cumplir compromisos internacionales [20].

Para garantizar la integridad ambiental, el Acuerdo de París establece principios claros que previenen el aumento global de emisiones de GEI mediante el uso de mecanismos de mercado. Por ejemplo, los mercados de carbono requieren la obtención y demostración de resultados de mitigación expresados en unidades de reducción de emisiones o incremento de remociones de GEI durante un periodo de tiempo determinado [2]. Además, estos mecanismos están diseñados para fortalecer el funcionamiento del mercado y fomentar buenas prácticas [2].

En resumen, el Acuerdo de París y las NDC proporcionan un marco para que los países trabajen conjuntamente en la lucha contra el cambio climático, promoviendo tanto la ambición climática como el desarrollo sostenible. El Artículo 6 refuerza esta cooperación, integrando mecanismos que incentivan la reducción de emisiones y aseguran la integridad ambiental [1], [9].

2.4 Evolución de las Emisiones Globales de CO₂ y Justificación de los Mercados de Carbono

El dióxido de carbono (CO₂) es el principal gas de efecto invernadero responsable del cambio climático, y su aumento en la atmósfera está directamente relacionado con las actividades humanas, particularmente desde la Revolución Industrial. En esta sección se analiza la evolución de las emisiones de CO₂ a nivel global y regional, utilizando datos de *Our World in Data* [1], para justificar la implementación y expansión de los mercados de carbono como herramientas clave para mitigar el cambio climático.

2.4.1 Evolución Histórica de las Emisiones Globales de CO₂

Desde 1750, las emisiones globales de CO₂ han crecido de manera exponencial, pasando de niveles insignificantes a más de 35 mil millones de toneladas anuales en 2023 [1]. Este crecimiento está impulsado principalmente por la quema de combustibles fósiles, el uso de energía industrial y la deforestación [1]. Las emisiones aumentaron significativamente tras la Segunda Guerra Mundial, coincidiendo con el auge del desarrollo industrial a nivel global [1].

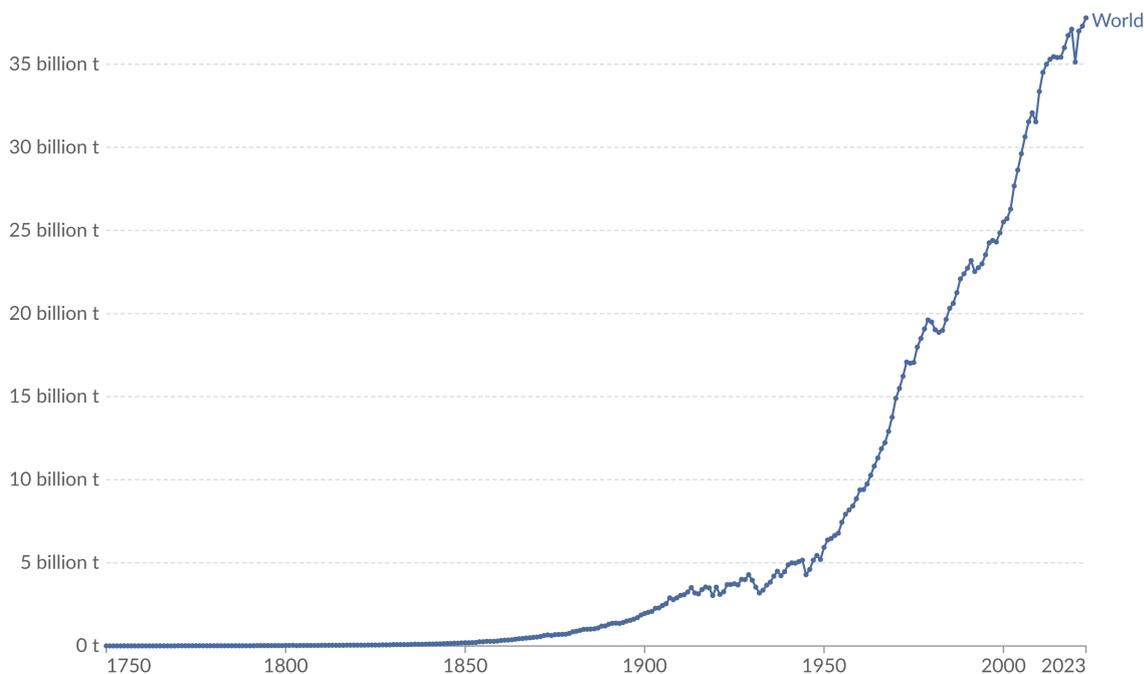
Desde 1970 hasta 2019, las emisiones globales de CO₂ han estado marcadas por cambios significativos, incluyendo un notable aumento en la producción de CO₂ y una dispersión geográfica hasta el año 2000 [3]. Sin embargo, a partir de este punto, se ha observado una mayor concentración de las emisiones en ciertas regiones, con China emergiendo como un actor clave [3]. Este

patrón refleja transformaciones importantes en las trayectorias de emisiones de muchos países, que pueden clasificarse dentro de un modelo lineal con puntos de cambio [3].

Annual CO₂ emissions

Carbon dioxide (CO₂) emissions from fossil fuels and industry¹. Land-use change is not included.

Our World
in Data



Data source: Global Carbon Budget (2024)

OurWorldinData.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions | CC BY

1. Fossil emissions: Fossil emissions measure the quantity of carbon dioxide (CO₂) emitted from the burning of fossil fuels, and directly from industrial processes such as cement and steel production. Fossil CO₂ includes emissions from coal, oil, gas, flaring, cement, steel, and other industrial processes. Fossil emissions do not include land use change, deforestation, soils, or vegetation.

Figura 2: Evolución histórica de las emisiones globales de CO₂ desde 1750 hasta 2023. Las emisiones han aumentado de forma exponencial, impulsadas principalmente por la quema de combustibles fósiles, la deforestación y la industrialización. Fuente: Our World in Data [1].

El gráfico presentado en la Figura 2 muestra la tendencia histórica de las emisiones globales de CO₂. Durante el siglo XIX, las emisiones eran insignificantes en comparación con los niveles actuales, pero comenzaron a crecer de manera notable a medida que se expandieron los procesos industriales y el uso de combustibles fósiles [1].

El aumento continuo en las emisiones demuestra el impacto acumulativo de las actividades humanas en el sistema climático, destacando la urgencia de implementar medidas de mitigación efectivas. La curva ascendente también subraya cómo las actividades humanas han transformado el sistema climático global en un período de tiempo relativamente corto. Esto justifica la necesi-

dad de soluciones globales como los mercados de carbono, que pueden incentivar reducciones en las emisiones y fomentar una transición hacia economías bajas en carbono de la que hablaremos más en profundidad en la siguiente sección [1, 3].

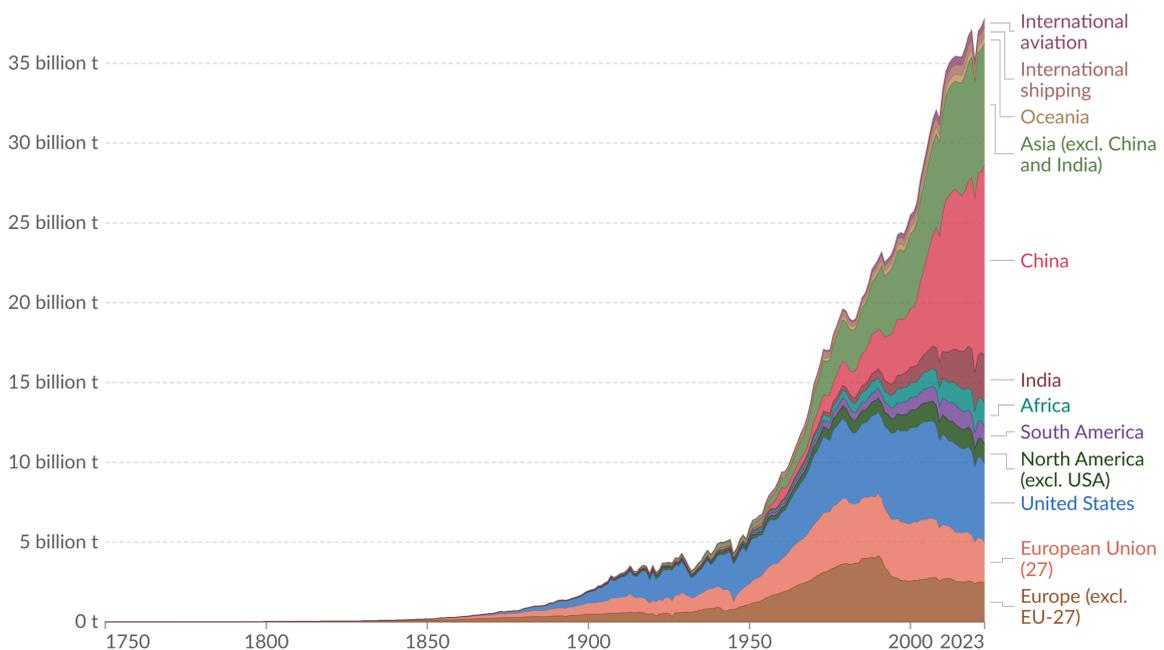
2.4.2 Distribución Regional de las Emisiones de CO₂

El análisis de las emisiones de CO₂ por región muestra cambios significativos en su distribución a lo largo del tiempo. Asia lidera actualmente en términos de emisiones absolutas, representando más del 50% del total global, mientras que Europa y América del Norte han reducido su proporción relativa en las últimas décadas gracias a políticas de descarbonización [1]. .

Annual CO₂ emissions by world region

Emissions from fossil fuels and industry¹ are included, but not land-use change emissions. International aviation and shipping are included as separate entities, as they are not included in any country's emissions.

Our World
in Data



Data source: Global Carbon Budget (2024)

OurWorldinData.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions | CC BY

1. Fossil emissions: Fossil emissions measure the quantity of carbon dioxide (CO₂) emitted from the burning of fossil fuels, and directly from industrial processes such as cement and steel production. Fossil CO₂ includes emissions from coal, oil, gas, flaring, cement, steel, and other industrial processes. Fossil emissions do not include land use change, deforestation, soils, or vegetation.

Figura 3: Emisiones de CO₂ por región. Fuente: Our World in Data [2].

La Figura 3 ilustra cómo las emisiones de CO₂ han evolucionado regionalmente desde 1750 hasta 2023. Asia, con un crecimiento acelerado debido a su desarrollo industrial, se ha consolidado

como el mayor emisor absoluto. Por otro lado, regiones como Europa y América del Norte han reducido su participación relativa en el total global, gracias a la implementación de políticas de transición energética y descarbonización.

Además, la distribución regional de las emisiones ha cambiado con el tiempo. Hasta el año 2000, las emisiones eran más dispersas geográficamente, pero desde entonces ha habido una tendencia hacia una mayor concentración, impulsada principalmente por el crecimiento económico de países como China [3]. Este cambio ha llevado a una disminución en la varianza espacial de las emisiones, sugiriendo que las emisiones se están volviendo más homogéneas en términos de distribución geográfica.

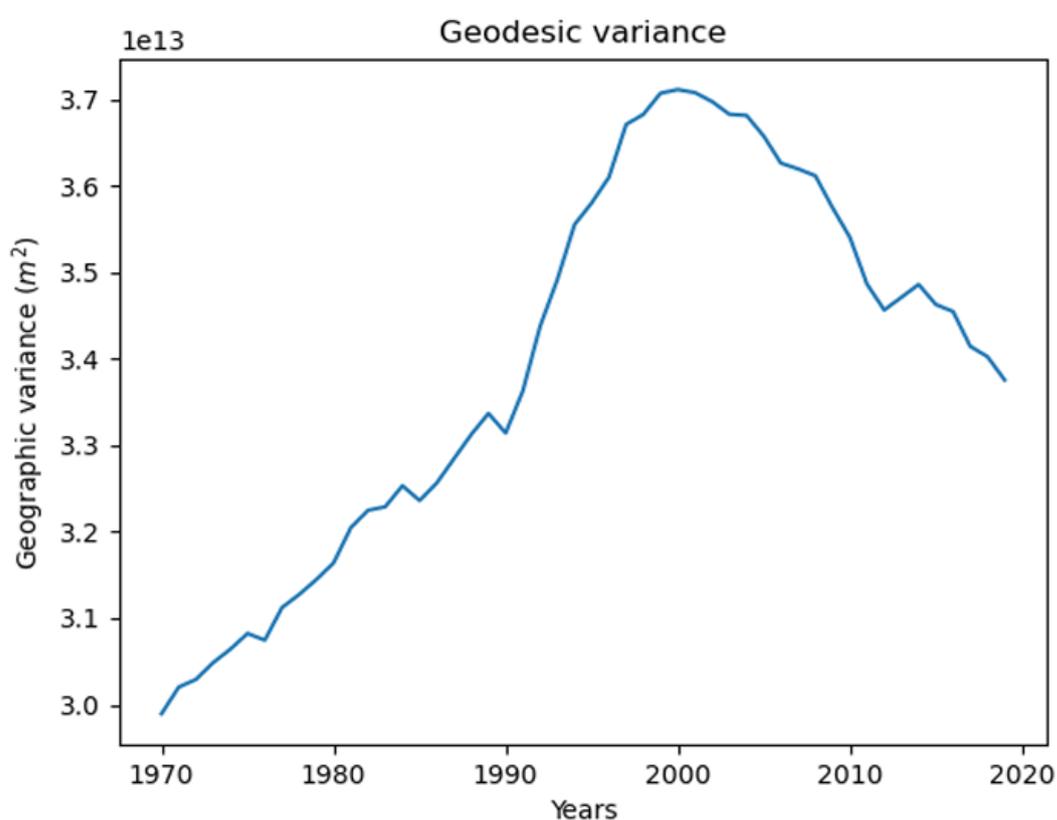


Figura 4: Varianza geográfica de las emisiones de CO₂ entre 1970 y 2019. Fuente: James y Menzies [3].

La Figura 4 respaldan lo expuesto anteriormente analizando la varianza geográfica de las emisiones de CO₂ desde 1970 hasta 2019. Durante las primeras décadas, se observa un aumento en la dispersión geográfica de las emisiones, alcanzando un máximo alrededor del año 2000. Sin embargo, a partir de ese punto, la varianza disminuye, lo que indica una mayor concentración de las emisiones en regiones específicas, principalmente en Asia.

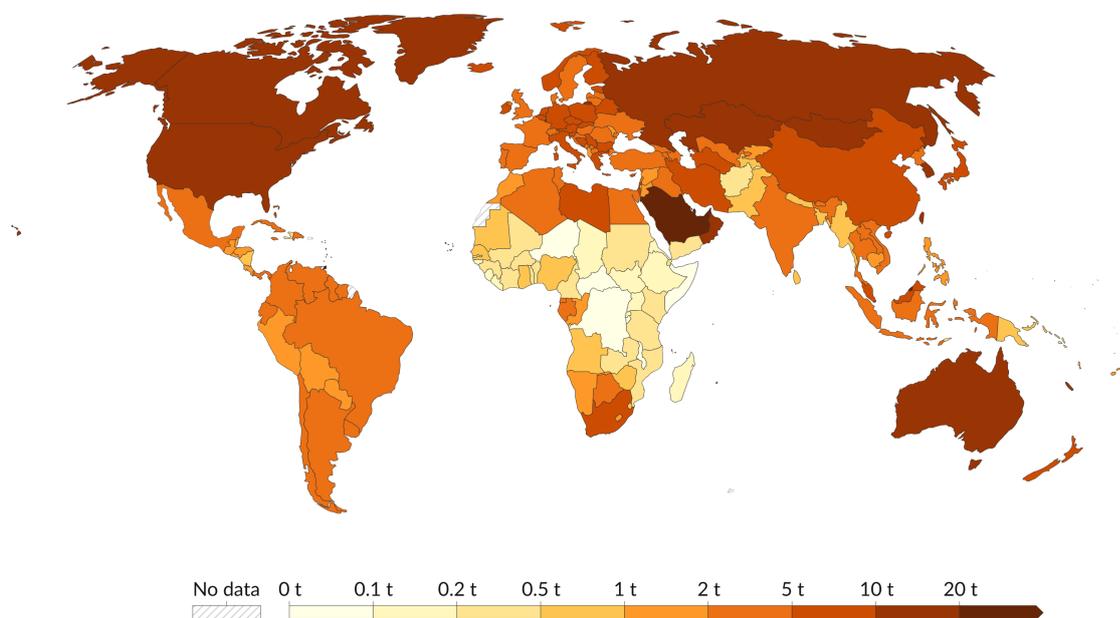
2.4.3 Emisiones Per Cápita

Las emisiones de CO₂ per cápita presentan disparidades significativas entre países desarrollados y en desarrollo. Naciones como Estados Unidos y Australia registran emisiones per cápita muy altas, mientras que países de Asia y África muestran niveles considerablemente más bajos [1]. Esta desigualdad subraya la importancia de los mercados de carbono, que pueden fomentar la transferencia de recursos financieros y tecnológicos para ayudar a las naciones en desarrollo a implementar estrategias de mitigación.

Per capita CO₂ emissions, 2023



Carbon dioxide (CO₂) emissions from fossil fuels and industry¹. Land-use change is not included.



Data source: Global Carbon Budget (2024); Population based on various sources (2024)
OurWorldinData.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions | CC BY

1. Fossil emissions: Fossil emissions measure the quantity of carbon dioxide (CO₂) emitted from the burning of fossil fuels, and directly from industrial processes such as cement and steel production. Fossil CO₂ includes emissions from coal, oil, gas, flaring, cement, steel, and other industrial processes. Fossil emissions do not include land use change, deforestation, soils, or vegetation.

Figura 5: Emisiones de CO₂ per cápita por país. Fuente: Our World in Data [1].

El gráfico Figura 5 muestra las variaciones significativas en las emisiones de CO₂ per cápita entre países y regiones. Países con un bajo Índice de Desarrollo Humano (IDH), como Vietnam y Bangladesh, han experimentado un aumento en sus emisiones per cápita, mientras que naciones como el Reino Unido y Ucrania han mostrado tendencias a la baja [3]. Este análisis es crucial para

entender las dinámicas de desarrollo y sostenibilidad en el contexto de las emisiones globales.

Además, el análisis regional permite observar tendencias globales más amplias. En el siguiente gráfico de barras, se agrupan las regiones mundiales y se muestran los valores promedio tanto del Índice de Capital Humano como de las emisiones de CO₂ per cápita:

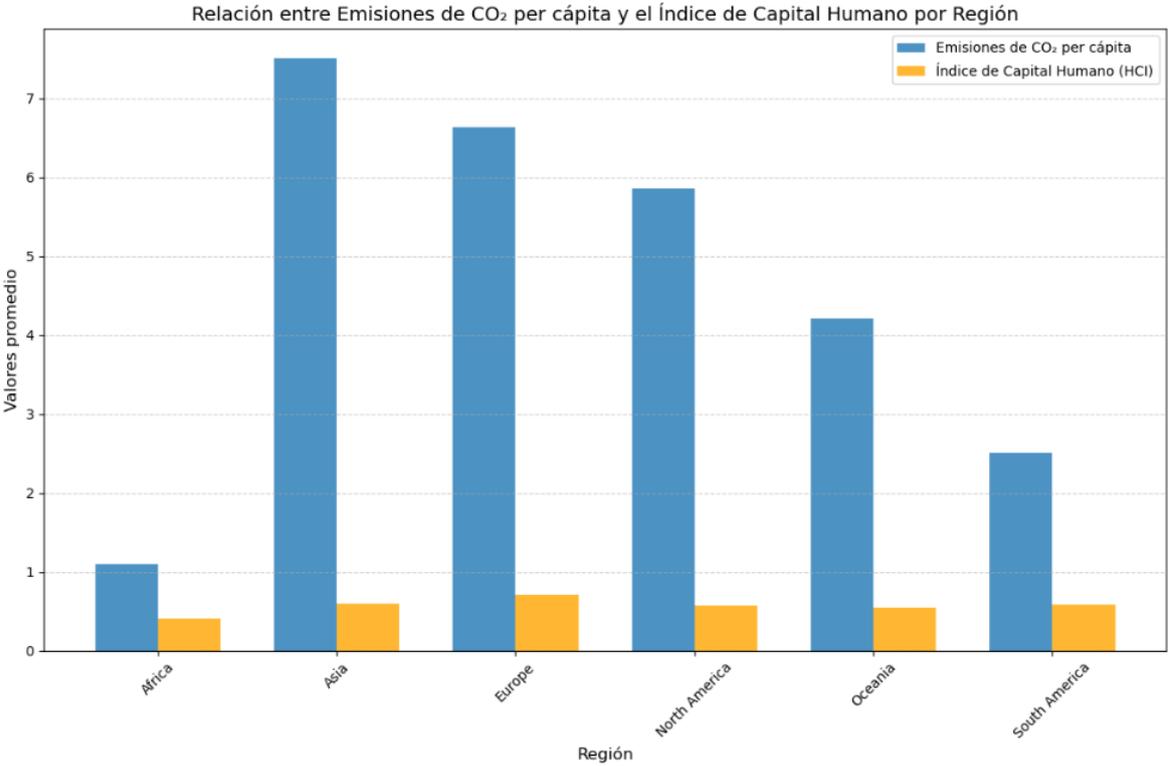


Figura 6: Relación entre las emisiones de CO₂ per cápita y el Índice de Capital Humano por región. Fuente: Elaboración propia.

El gráfico Figura 6 destaca que las regiones como Asia y Europa tienen los valores más altos en emisiones de CO₂ per cápita, impulsadas principalmente por economías industrializadas como pueden ser China y Alemania. Por otro lado, África presenta emisiones considerablemente bajas, lo que refleja menores niveles de industrialización en comparación con otras regiones. En cuanto al Índice de Capital Humano (HCI), Europa lidera con valores altos, mientras que África y Asia tienen índices más bajos, evidenciando desigualdades en el desarrollo humano.

Para ilustrar la relación específica entre el desarrollo humano y las emisiones per cápita a nivel global, se presenta el siguiente gráfico de dispersión:

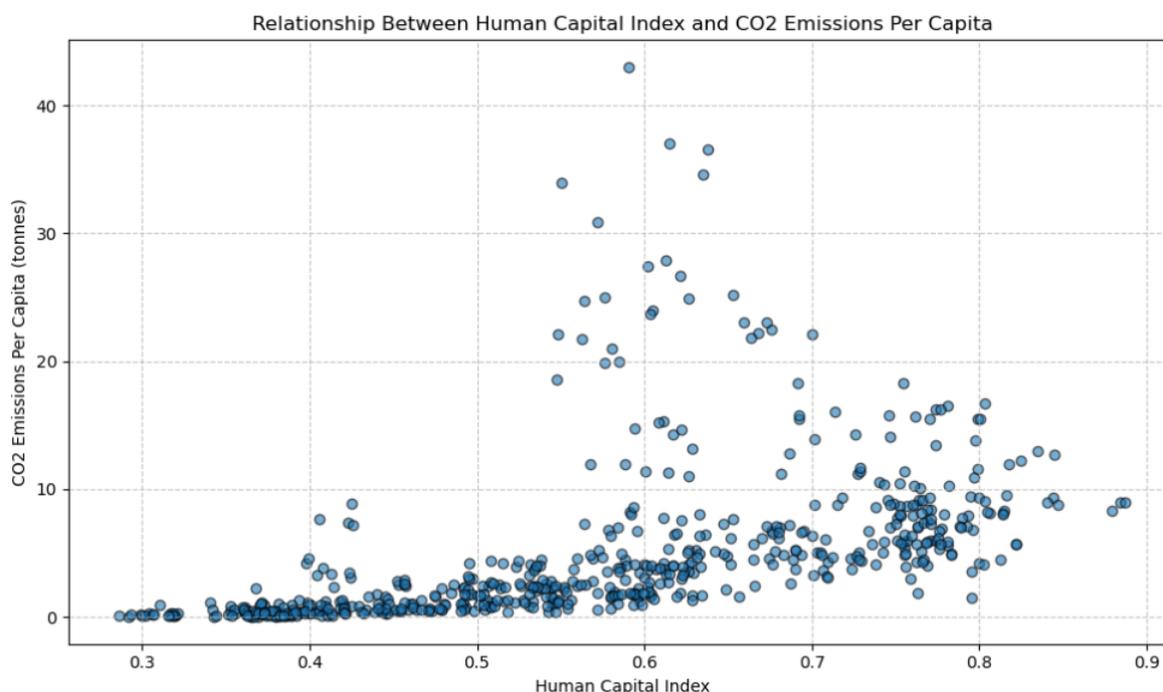


Figura 7: Relación entre el Índice de Desarrollo Humano (HCI) y las emisiones de CO₂ per cápita. Fuente: Elaboración propia.

El gráfico Figura 7 permite identificar una correlación entre un mayor Índice de Desarrollo Humano y las emisiones per cápita de CO₂. Sin embargo, existen excepciones que muestran que algunos países logran altos niveles de desarrollo humano con emisiones moderadas, como en el caso de ciertas naciones europeas. Este análisis subraya la importancia de adoptar políticas sostenibles y promover tecnologías limpias que permitan un desarrollo humano elevado sin aumentar significativamente las emisiones.

2.4.4 Justificación de los Mercados de Carbono

El cambio climático es un desafío global que trasciende fronteras, afectando a todas las regiones y sectores económicos. La distribución desigual de las emisiones de CO₂, tanto históricamente como en términos per cápita, evidencia la naturaleza transnacional del problema y refuerza la necesidad de soluciones cooperativas [1, 3]. En este contexto, los mercados de carbono se posicionan como un mecanismo eficiente para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), promoviendo reducciones donde sean más costo-efectivas y facilitando una transición hacia economías bajas en carbono.

1. Eficiencia económica y reducción de emisiones

Los mercados de carbono asignan un precio explícito al carbono, internalizando las externalidades negativas de las emisiones de GEI y creando incentivos financieros para invertir en tecnologías limpias y proyectos de mitigación. Este sistema permite que los emisores con menores costos de reducción vendan sus excedentes de emisiones a quienes enfrentan costos más altos, optimizando el uso de recursos y reduciendo las emisiones totales de manera más eficiente [4, 19]. Además, los mercados de carbono ayudan a acelerar la adopción de tecnologías limpias al proporcionar señales de precio claras que estimulan la innovación tecnológica [3].

2. Promoción de la equidad y transferencia de recursos

La implementación de mercados de carbono facilita la transferencia de recursos financieros y tecnológicos desde las naciones más desarrolladas hacia los países en desarrollo. Esto es especialmente relevante dado que las emisiones históricas de los países industrializados han contribuido significativamente al problema actual del cambio climático. Por su parte, muchas naciones en desarrollo enfrentan barreras económicas y tecnológicas que limitan su capacidad para implementar estrategias de mitigación [1]. Los ingresos generados a través de los mercados de carbono pueden ser canalizados hacia programas que fomenten la resiliencia climática, la descarbonización de economías emergentes y el cumplimiento de las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC) [19].

3. Impacto en las disparidades regionales

El análisis de las tendencias globales y regionales de las emisiones de CO₂ revela disparidades significativas en términos de contribución y capacidad de mitigación. Mientras que regiones como Asia lideran en términos absolutos debido a su crecimiento industrial acelerado, otras como África muestran niveles bajos de emisiones per cápita pero enfrentan grandes desafíos socioeconómicos [3]. Los mercados de carbono ofrecen una herramienta para equilibrar estas disparidades al redistribuir responsabilidades y costos de mitigación, promoviendo una transición climática equitativa.

4. Contribución a los objetivos globales

En línea con los compromisos internacionales, como el Acuerdo de París, los mercados de carbono son fundamentales para alcanzar los objetivos de limitar el aumento de la temperatura global a 1.5°C por encima de los niveles preindustriales. Al establecer límites claros de emisiones y fomentar reducciones a través de mecanismos de mercado, se garantiza la integridad ambiental y el cumplimiento de las metas climáticas globales [1, 3].

En resumen, los mercados de carbono son una herramienta clave en la lucha contra el cambio climático. No solo proporcionan un marco económico para reducir emisiones de manera eficiente, sino que también promueven la equidad, la transferencia de recursos y la colaboración internacional. Al abordar tanto las disparidades regionales como los desafíos globales, los mercados de carbono facilitan una transición justa hacia una economía baja en carbono, asegurando al mismo tiempo el cumplimiento de los compromisos climáticos internacionales [19, 1, 3].

3 HUELLA DE CARBONO

En un contexto de creciente urgencia climática, la huella de carbono se ha consolidado como uno de los indicadores clave para evaluar el impacto ambiental de actividades humanas. Este concepto permite cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas a individuos, productos, procesos y organizaciones, convirtiéndose en una herramienta esencial para impulsar estrategias de mitigación. En esta sección se presentan los principales enfoques para definir, clasificar y medir la huella de carbono, destacando su relevancia como instrumento de sostenibilidad y acción climática.

3.1 Definición de huella de carbono

La huella de carbono se define como la cantidad total de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos directa o indirectamente por un individuo, organización, evento o producto [4]. De acuerdo con Berners-Lee, profesor de la Universidad de Lancaster, la huella de carbono es "la suma total de todas las emisiones de gases de efecto invernadero que han tenido lugar para que se produzca un producto o se realice una actividad"[27].

El análisis de la huella de carbono es crucial, ya que permite identificar todas las fuentes de emisiones de GEI asociadas a una actividad o producto, proporcionando una base para diseñar estrategias de reducción efectivas [4].

3.2 Tipos de huella de carbono

La huella de carbono puede adoptar diferentes formas dependiendo del objeto de análisis. Ya sea a nivel organizacional, de producto o personal, cada tipo de huella permite identificar con mayor precisión las fuentes de emisión de GEI y establecer medidas específicas de reducción. Esta clasificación es fundamental para adaptar las estrategias de sostenibilidad a distintos contextos operativos y niveles de responsabilidad climática.

3.2.1 Huella de carbono de una organización

La huella de carbono de una organización mide la totalidad de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos de forma directa o indirecta como consecuencia del desarrollo de sus actividades. Estas emisiones incluyen las derivadas del consumo de energía, transporte, generación de residuos y cualquier otra actividad operacional [4]. Existen dos tipos de emisiones asociadas a la huella de

carbono de una organización:

Las emisiones directas son aquellas liberadas en el lugar donde se produce la actividad; por ejemplo, un calentador de gas natural instalado en una oficina. Por otro lado, las emisiones indirectas son aquellas generadas fuera del lugar donde se realiza la actividad, pero que están vinculadas a las operaciones de la organización. Un ejemplo común es el consumo de electricidad en una oficina, que genera emisiones en la planta de generación de energía [5].

Calcular la huella de carbono de una organización no solo permite cuantificar las emisiones, sino también identificar oportunidades para implementar medidas de reducción que minimicen su impacto ambiental y promuevan la sostenibilidad de sus operaciones [27]. Este cálculo también ofrece varias ventajas:

- **Mejora de la imagen pública:** Las organizaciones que calculan y reducen su huella de carbono pueden obtener certificaciones que refuercen su compromiso ambiental, mejorando así su percepción ante clientes y socios [5].
- **Adaptación a cambios legislativos:** A medida que las normativas ambientales se vuelven más estrictas, las organizaciones que midan su huella de carbono estarán mejor preparadas para cumplir con estas regulaciones y evitar sanciones [5].
- **Respuesta a las exigencias de los consumidores:** En un contexto donde los consumidores priorizan productos con menor impacto ambiental, calcular y reducir la huella de carbono puede aumentar la competitividad de la organización [5].
- **Contribución a la mitigación del cambio climático:** La cuantificación y reducción de emisiones forman parte de los esfuerzos globales para prevenir un desastre climático, una responsabilidad compartida que afecta a toda la sociedad [5].

En resumen, medir la huella de carbono de una organización no solo es un paso hacia la sostenibilidad, sino que también ofrece beneficios tangibles en términos de cumplimiento regulatorio, ventaja competitiva y adaptación a las demandas del mercado, reforzando el papel de la organización en la lucha contra el cambio climático.

3.2.2 Huella de carbono de producto

La huella de carbono de producto se centra en el análisis de las emisiones de GEI generadas a lo largo del ciclo de vida completo de un producto. Esto incluye todas las etapas: desde la extracción de materias primas, el procesamiento y fabricación, la distribución, el uso por

parte del consumidor, hasta el final de su vida útil, que puede implicar reciclaje, reutilización o disposición final [4].

Este enfoque permite identificar puntos críticos en las diferentes etapas del ciclo de vida, optimizando los procesos y reduciendo las emisiones asociadas [27].

3.2.3 Huella de carbono personal

La huella de carbono personal representa el total de emisiones de gases de efecto invernadero generadas por un individuo a partir de sus hábitos cotidianos y patrones de consumo. Elementos como el tipo de transporte empleado, el uso de energía en el hogar y la dieta desempeñan un papel clave en la cantidad de CO₂ emitida. De acuerdo con Berners-Lee, una persona promedio a nivel mundial libera cerca de 7 toneladas de CO₂ al año, mientras que esta cifra asciende a 13 toneladas en el caso del ciudadano británico promedio y a 21 toneladas en Estados Unidos. En comparación, un habitante promedio de Nigeria o Malí necesitaría solo unos días para alcanzar dicha cantidad de emisiones [27].

3.3 Medición de la Huella de Carbono

La medición de la huella de carbono permite cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas a una actividad, producto u organización [4]. Este cálculo se expresa en términos de dióxido de carbono equivalente (CO₂e), lo que facilita la comparación entre distintos procesos y sectores [28]. Dada la creciente preocupación por el cambio climático, este indicador se ha convertido en una herramienta clave para identificar oportunidades de reducción de emisiones y diseñar estrategias de sostenibilidad [4].

3.3.1 Evaluación del Ciclo de Vida (ACV) y Métodos de Cálculo

Uno de los principales métodos empleados para medir la huella de carbono es la **Evaluación del Ciclo de Vida (ACV)**, la cual permite analizar todas las emisiones de GEI asociadas a un producto, servicio o actividad desde su origen hasta su disposición final [4, 28]. Este enfoque comprende múltiples etapas, incluyendo:

- **Extracción de materias primas:** se consideran las emisiones generadas por la obtención de los recursos naturales necesarios para la fabricación de bienes o servicios [4].
- **Procesamiento y manufactura:** evalúa el consumo energético y las emisiones de GEI

durante la transformación de las materias primas [28].

- **Distribución y transporte:** se incluyen las emisiones generadas por el traslado de productos desde su punto de origen hasta el consumidor final [4].
- **Uso y consumo:** analiza el impacto ambiental durante la fase de utilización del producto o servicio [28].
- **Fin de vida útil:** abarca las emisiones derivadas del reciclaje, la reutilización o la eliminación final del producto [4].

A través de la ACV, se identifican las fuentes principales de emisiones de GEI, lo que permite a empresas y gobiernos desarrollar estrategias de reducción más efectivas [28].

3.3.2 Factores y Complejidad en la Medición

La medición precisa de la huella de carbono es un proceso complejo debido a la gran cantidad de variables involucradas. Según Berners-Lee, esta tarea es "esencial pero imposible" de realizar con total precisión, ya que implica evaluar múltiples factores, desde el consumo energético hasta la extracción de los materiales empleados en un producto [27].

Por ejemplo, calcular la huella de carbono de un automóvil requiere considerar las emisiones generadas en la extracción de los minerales, la fabricación de los componentes, el transporte hasta la planta de ensamblaje y el uso del vehículo a lo largo de su vida útil. Dada esta complejidad, en muchas ocasiones se opta por estimaciones aproximadas en lugar de cálculos exactos [27].

3.3.3 Herramientas para el Cálculo de la Huella de Carbono

En los últimos años han surgido diversas herramientas digitales que permiten estimar la huella de carbono de individuos, organizaciones y productos [27]. Algunas de las más utilizadas incluyen:

- **Calculadoras en línea:** plataformas como las de *Nature Conservancy* y la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. permiten a los usuarios calcular sus emisiones personales en función de factores como el consumo de energía en el hogar, los hábitos de transporte y la dieta [27].
- **Software de análisis empresarial:** organizaciones y gobiernos emplean programas especializados para calcular su impacto ambiental, facilitando la toma de decisiones estratégicas [27].

- **Herramientas gubernamentales:** en España, el Ministerio para la Transición Ecológica ha desarrollado sistemas para estimar la huella de carbono de empresas y evaluar las absorciones de CO₂ generadas por proyectos de compensación [27].

Estas herramientas permiten realizar mediciones aproximadas, ofreciendo información valiosa para reducir la huella de carbono a nivel individual y corporativo [27].

3.3.4 Importancia de la Medición de la Huella de Carbono

La medición de la huella de carbono es fundamental para mitigar el cambio climático y promover la sostenibilidad. Al identificar las principales fuentes de emisiones de GEI, se pueden diseñar políticas más efectivas para reducirlas [4]. Además, proporciona beneficios tanto ambientales como económicos:

- **Reducción de emisiones:** permite implementar estrategias para disminuir el impacto ambiental de industrias y consumidores [28].
- **Optimización de procesos:** ayuda a las empresas a mejorar su eficiencia energética y reducir costos operativos [4].
- **Cumplimiento de regulaciones:** cada vez más gobiernos imponen normativas que obligan a las organizaciones a calcular y reportar su huella de carbono [27].

En conclusión, la medición de la huella de carbono es un paso clave hacia una economía baja en carbono. A través de metodologías como la Evaluación del Ciclo de Vida y herramientas de cálculo avanzadas, es posible cuantificar y gestionar el impacto ambiental, facilitando la adopción de medidas de mitigación que contribuyan a la lucha contra el cambio climático [4, 27, 28].

3.4 Tipos de alcance en la medición de la huella de carbono

Para llevar a cabo una medición rigurosa de la huella de carbono, es esencial distinguir entre los diferentes tipos de emisiones en función de su origen y grado de control por parte de la organización. Esta distinción se estructura en tres alcances —alcance 1, 2 y 3— que permiten clasificar las emisiones directas e indirectas de manera estandarizada. Comprender esta tipología es clave para identificar los principales focos de emisiones y establecer estrategias de mitigación eficaces, alineadas con estándares internacionales como el Protocolo de Gases de Efecto Invernadero (GHG Protocol).

3.4.1 Alcance 1: Emisiones Directas de GEI

Las emisiones de alcance 1 comprenden todas aquellas emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) generadas directamente por fuentes que son propiedad o están bajo el control de una [4]. Estas emisiones incluyen las que provienen de la combustión de combustibles fósiles en instalaciones propias, como calderas, hornos o generadores. Asimismo, abarcan el uso de vehículos corporativos que funcionan con combustibles fósiles y las fugas de gases refrigerantes, además de otras emisiones accidentales que puedan generarse en las operaciones [5].

3.4.2 Alcance 2: Emisiones Indirectas de GEI Relacionadas con la Energía

El alcance 2 se refiere a las emisiones indirectas de GEI que resultan de la generación de electricidad, calor o vapor adquiridos y consumidos por una organización [4]. Estas emisiones, aunque no son generadas directamente por la empresa, están asociadas a su consumo energético. Entre las principales fuentes de alcance 2 se encuentran la producción de electricidad en plantas externas y el uso de sistemas de calefacción o refrigeración centralizada suministrados por terceros [5].

3.4.3 Alcance 3: Otras Emisiones Indirectas de GEI

El alcance 3 abarca las emisiones indirectas más amplias y complejas, que no están bajo el control directo de la organización pero que son consecuencia de su actividad [4]. Estas emisiones incluyen aquellas derivadas de la fabricación de productos y servicios adquiridos, así como el transporte de empleados y bienes asociados a la operación de la empresa. También abarca las emisiones generadas durante la gestión y disposición de los residuos producidos [5].

A continuación, se presenta una representación gráfica de los tres alcances en la medición de la huella de carbono:

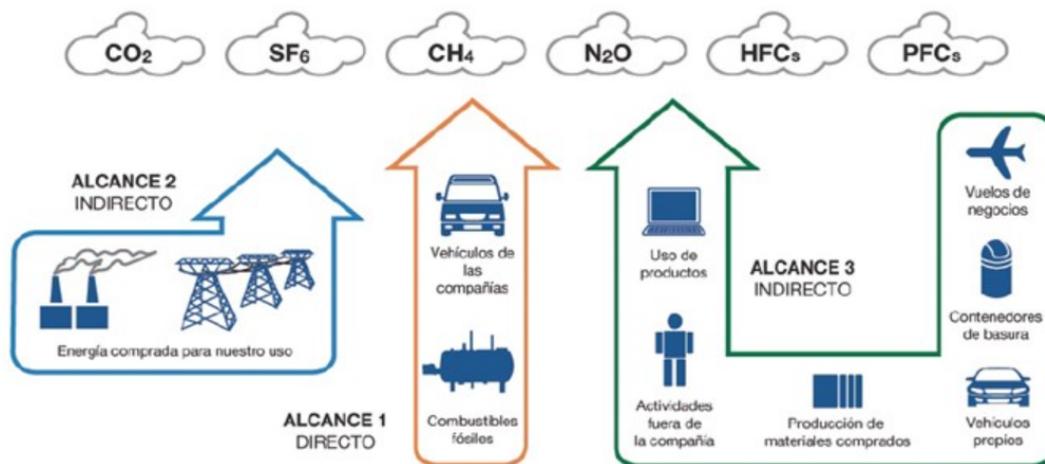


Figura 8: Clasificación de los alcances en la medición de la huella de carbono: directo e indirecto. Fuente: Adaptado de CSR Consulting y otras fuentes [4, 5].

El gráfico Figura 8 proporciona una visión clara y estructurada de cómo se clasifican las emisiones en los tres alcances. Desde las emisiones directas que son resultado de actividades controladas por la organización hasta las indirectas relacionadas con actividades externas en la cadena de valor, esta representación subraya la necesidad de una medición integral y precisa de la huella de carbono. Entender estos alcances no solo permite identificar las principales fuentes de emisión, sino que también ayuda a establecer prioridades en las estrategias de reducción.

La medición de la huella de carbono es un pilar fundamental en la lucha contra el cambio climático, ya que proporciona un marco para comprender y gestionar el impacto ambiental de individuos y organizaciones. Metodologías como la Evaluación de Ciclo de Vida (ACV) y herramientas digitales han facilitado este proceso, haciendo posible no solo identificar las emisiones, sino también implementar acciones de mitigación más efectivas [4, 27, 28].

Además, la creciente presión de regulaciones gubernamentales y la preferencia de los consumidores por prácticas sostenibles han incentivado a más organizaciones a adoptar estrategias de descarbonización y sostenibilidad. La clasificación en alcances 1, 2 y 3 no solo mejora la claridad en la medición, sino que también refuerza la capacidad de las organizaciones para abordar sus emisiones desde un enfoque más estratégico y alineado con la transición hacia una economía baja en carbono [27].

En definitiva, entender y gestionar la huella de carbono no solo contribuye a la reducción de emisiones globales, sino que también genera beneficios económicos y reputacionales para las organizaciones que eligen liderar este cambio. El gráfico Figura 8 destaca la importancia de una comprensión integral de los alcances, sirviendo como guía para fomentar un enfoque sistemático

y efectivo en la medición y gestión de la huella de carbono.

4 ANÁLISIS DE MERCADOS DE CARBONO EXISTENTES

En las últimas décadas, los mercados de carbono se han consolidado como instrumentos clave en la estrategia global contra el cambio climático. Estos mecanismos, tanto en su modalidad regulada como voluntaria, permiten asignar un precio a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), incentivando la reducción de emisiones allí donde sea más eficiente. Esta sección analiza la estructura, cobertura, evolución y precios de los principales mercados de carbono a nivel mundial, diferenciando entre sistemas regulados —como el EU ETS o el mercado chino— y el mercado voluntario, en rápida transformación. A través de este análisis, se ofrece una visión comparada del grado de implementación, la ambición climática y los desafíos que enfrenta cada tipo de mercado en el contexto de la transición hacia una economía baja en carbono.

4.1 Tamaño y Estructura del Mercado de Créditos de Carbono Regulado

En esta sección se analiza el tamaño y características principales de los mercados de carbono regulados a nivel mundial. Para facilitar su comprensión, se divide el análisis en dos bloques: (i) cobertura de emisiones y (ii) niveles de precio del carbono.

4.1.1 Cobertura de Emisiones de los Mercados de Carbono

En las últimas décadas, los mercados de carbono se han consolidado como uno de los mecanismos más relevantes a nivel internacional para luchar contra el cambio climático, permitiendo la limitación y la reducción progresiva de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a través de un sistema de fijación de precios al carbono [2].

El origen de estos mercados se encuentra en la creación, en 2005, del Sistema de Comercio de Emisiones de la Unión Europea (EU ETS), considerado el primer gran mercado regulado de derechos de emisión en el mundo y actualmente el de mayor tamaño y referencia internacional [2], [7]. Desde entonces, el número de sistemas ETS (Emissions Trading Systems) se ha multiplicado considerablemente, siendo adoptados por un número creciente de jurisdicciones a nivel mundial.

A día de hoy, existen 34 sistemas ETS implementados en regiones y países que representan más del 55 % del PIB global y un tercio de la población mundial, cubriendo aproximadamente el 17 % de las emisiones globales anuales de GEI [7]. Entre estos sistemas destacan, además del EU ETS, los establecidos en Reino Unido, China, Nueva Zelanda, Corea del Sur, Indonesia, California o Canadá. Asimismo, otros países como Brasil, Vietnam o Colombia se encuentran en proceso de desarrollo o consideración de sus propios sistemas ETS [7].

Entre los países pioneros y más destacados en el desarrollo de estos mecanismos cabe resaltar:

- **Unión Europea:** La UE ha sido un referente internacional gracias a su ambiciosa política climática y medioambiental, siendo la primera región en establecer un mercado de carbono a gran escala (EU ETS). Este sistema cubre cerca del 40 % de las emisiones de GEI de Europa, limitando las emisiones de sectores como la industria, la aviación y el sector eléctrico [2].
- **Emiratos Árabes Unidos:** Este país ha demostrado una creciente ambición climática, convirtiéndose en el primer Estado del Golfo Pérsico en comprometerse a lograr las emisiones netas cero en 2050. Entre sus principales avances destaca la creación, en 2022, de la primera plataforma digital totalmente regulada de comercio de carbono con sede en Abu Dhabi. Este sistema permite comercializar créditos de carbono como activos financieros, favoreciendo la inversión privada y ampliando la financiación climática [2].

Una visión agregada de la estructura actual de los mercados de carbono regulados permite observar dos grandes conclusiones:

- Por un lado, a nivel mundial, un 24 % de las emisiones globales están cubiertas por instrumentos de precio al carbono. De este total, el 19 % corresponde a sistemas ETS y el 6 % a impuestos al carbono.
- Por otro lado, la mayoría de esta cobertura corresponde a países de altos ingresos, donde los sistemas de precios al carbono están más consolidados. En concreto, el 31 % de las emisiones de países de rentas altas están cubiertas por algún mecanismo de precio al carbono, frente al 22 % en economías de renta media y prácticamente inexistente en economías de renta baja [26]. CO₂

Esta realidad se visualiza de manera clara en la Figura 9, donde se muestra la cobertura actual de las emisiones globales por instrumentos de precio al carbono y nivel de renta de los países.

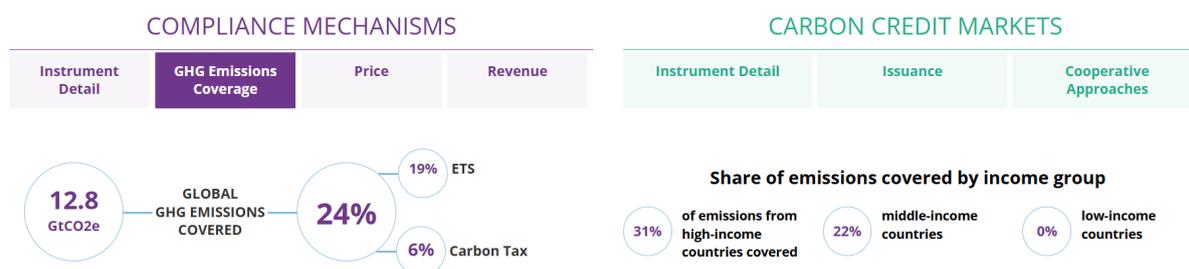


Figura 9: Cobertura de emisiones de los principales mecanismos de cumplimiento a nivel mundial. El gráfico permite observar que actualmente un 24 % de las emisiones globales de GEI están cubiertas por mecanismos de mercado, donde destacan los sistemas ETS (19 %) frente a los impuestos al carbono (6 %). Además, se aprecia que los países con mayor nivel de ingresos son los que cuentan con mayor cobertura de sus emisiones. Fuente: World Bank Carbon Pricing Dashboard [6].

4.1.2 Distribución Geográfica de los Mecanismos de Precio al Carbono

Esta realidad se aprecia de manera aún más clara al analizar la distribución geográfica de los sistemas ETS y los impuestos al carbono. El siguiente mapa muestra la cobertura de emisiones por país, diferenciando entre distintos niveles de intensidad.

En el mapa, los colores indican el porcentaje de las emisiones nacionales cubiertas por sistemas de comercio de emisiones o impuestos al carbono:

- Color negro / morado oscuro: Cobertura de entre el 80 % y el 100 % de las emisiones nacionales.
- Morado intenso: Cobertura de entre el 60 % y el 80 %.
- Morado medio: Cobertura de entre el 40 % y el 60 %.
- Morado claro: Cobertura de entre el 20 % y el 40 %.
- Lila muy claro: Cobertura inferior al 20 %.

Entre las regiones más destacadas se encuentran:

- **Europa:** Prácticamente toda la UE está cubierta por el EU ETS, con una alta cobertura de emisiones (entre el 40 % y el 100 % según país).

- **China:** Sistema nacional de ETS con cobertura creciente, aunque todavía inferior al 40 %.
- **Corea del Sur y Japón:** Sistemas avanzados con coberturas relevantes.
- **California y Canadá:** Sistemas ETS regionales y nacionales respectivamente.
- **Australia y Nueva Zelanda:** Sistemas ETS consolidados.
- **Sudáfrica y Chile:** Experiencias incipientes en mercados emergentes, con coberturas limitadas.

Covered emissions, 2024

Map shows jurisdictions with carbon taxes or emissions trading systems implemented, under development or under consideration, subject to any filters applied in the table below the map. The year can be adjusted using the slider below the map.

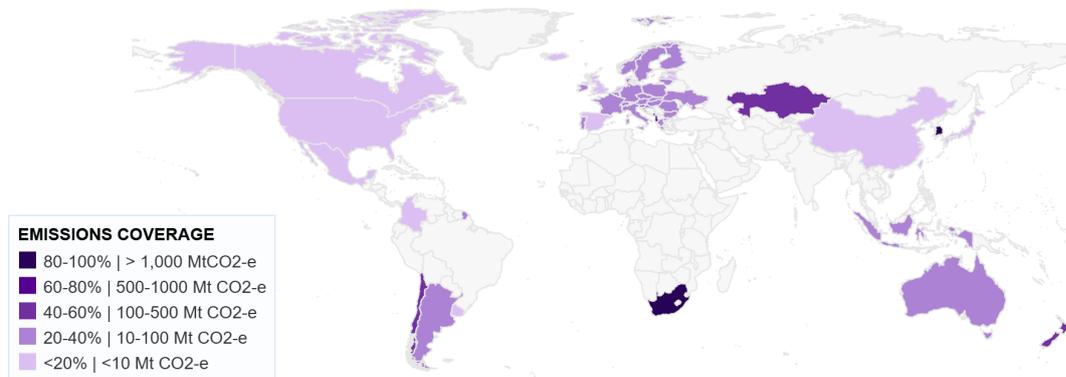


Figura 10: Mapa mundial de cobertura de emisiones, 2024. El mapa ilustra el grado de penetración de los mercados de carbono a nivel global, destacando especialmente Europa, China, Estados Unidos, Corea del Sur, Canadá y algunas regiones de Sudamérica y Oceanía. Fuente: World Bank Carbon Pricing Dashboard [6].

4.1.3 Precios del Carbono en los Mercados Regulados

Los precios del carbono varían significativamente en función de la jurisdicción y el instrumento utilizado (ETS o impuesto al carbono). En términos agregados, el rango de precios se sitúa actualmente entre 0,46 y 167 dólares por tonelada de CO₂e, siendo solo un 1 % de las emisiones globales las que presentan un precio superior al nivel recomendado por los organismos internacionales [6].



Figura 11: Rango de precios del carbono a nivel mundial, 2024. Fuente: World Bank Carbon Pricing Dashboard [6].

El siguiente mapa refleja la distribución geográfica de los precios del carbono a nivel mundial, destacando no solo la dispersión existente entre las diferentes jurisdicciones, sino también las claras diferencias regionales en el precio aplicado a las emisiones de carbono.

En el mapa, los colores indican el rango de precios del carbono (expresado en US\$ por tonelada de CO₂e) establecidos por los diferentes sistemas de comercio de emisiones (ETS) o impuestos al carbono:

- Color negro / morado intenso: Precios superiores a 80 US\$ por tonelada. Se concentran principalmente en Europa Occidental y Escandinavia (Suecia, Suiza, Noruega o Finlandia), así como en algunas provincias canadienses (British Columbia o Quebec).
- Morado medio: Precios entre 60 y 80 US\$ por tonelada. Aparecen en países europeos como Alemania, Francia o Irlanda, y en ciertos territorios de Canadá.
- Morado claro: Precios entre 40 y 60 US\$ por tonelada. Predomina en otras regiones europeas, Estados Unidos (especialmente California y la región noreste) y Nueva Zelanda.
- Lila claro: Precios entre 20 y 40 US\$ por tonelada. Se observa en China (ETS nacional y pilotos regionales), Australia, Japón y parte de América Latina (Chile, México o Uruguay).
- Lila muy suave: Precios inferiores a 20 US\$ por tonelada. Es el rango más habitual en economías emergentes de Asia, África y Latinoamérica, reflejando un menor desarrollo de los mecanismos de precios al carbono.

Este mapa pone de manifiesto cómo Europa y Norteamérica lideran claramente los precios del carbono a nivel mundial, mientras que las regiones de Asia, Latinoamérica y África se encuentran en fases mucho más iniciales de implementación y con precios notablemente inferiores.

Price of carbon around the world, 2024

Heat map shows the level of the main price set by emissions trading systems or Carbon taxes in each jurisdiction (US\$/tCO₂e), subject to any filters applied. The year can be adjusted using the slider below the map.

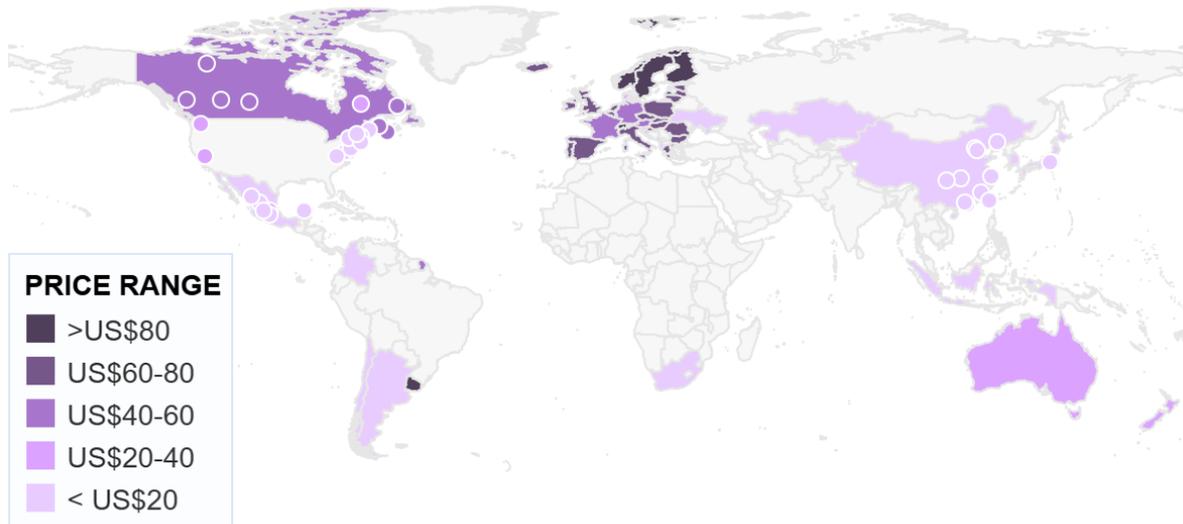


Figura 12: Mapa mundial de precios del carbono, 2024. El mapa muestra las diferencias regionales existentes en los precios aplicados a las emisiones de carbono, destacando que los precios más altos se localizan principalmente en Europa Occidental, Escandinavia y algunas regiones de Canadá, mientras que en América Latina, Asia y África los precios se mantienen en niveles más bajos. Fuente: World Bank Carbon Pricing Dashboard [6].

Finalmente, resulta interesante observar la evolución histórica de los precios del carbono en los principales mercados ETS a nivel mundial. La siguiente figura muestra cómo el EU ETS ha liderado claramente la subida de precios en los últimos años, seguido por el UK ETS y el NZ ETS, mientras que otros sistemas como California, Corea del Sur o China presentan precios más estables y reducidos [7].

Evolución del precio de los derechos de emisión en distintos mercados



Figura 13: Evolución del precio de los derechos de emisión en distintos mercados (2019-2023). Se observa un liderazgo del EU ETS en cuanto a precios, seguido del UK ETS y del NZ ETS, mientras que otros sistemas como California, Corea del Sur o China mantienen precios más bajos. Fuente: Iberdrola [7].

4.1.4 Evolución histórica y reciente del mercado voluntario de carbono

El mercado voluntario de carbono ha experimentado un crecimiento acelerado en los últimos años, aunque sigue representando una parte muy reducida dentro del mercado global de carbono. En sus inicios, durante la década de 2000, su tamaño era prácticamente residual, con un primer impulso ligado al Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), que llegó a generar unos 900 millones de créditos hasta 2013 [29].

Tras un periodo de estancamiento, la firma del Acuerdo de París (2015) y el auge de los compromisos net-zero revitalizaron el mercado. Entre 2018 y 2021, su valor transado anual creció de \$146 millones a casi \$2.000 millones [30], con un volumen récord de transacciones de 500 millones de toneladas de CO₂ en 2021 [30]. Este crecimiento se apoyó en un aumento tanto del volumen como del precio medio de los créditos, especialmente aquellos vinculados a proyectos naturales.

Sin embargo, desde 2022 el mercado ha entrado en una fase de corrección. Las transacciones cayeron un 50% en 2022 [31], principalmente por el aumento de la preocupación sobre la

integridad de algunos proyectos, especialmente forestales (REDD+), y por una mayor cautela por parte de los compradores corporativos. A pesar de ello, el valor total se mantuvo en torno a \$1.800-\$2.000 millones gracias a un aumento del precio medio hasta \$7/t [31].

En 2023, esta tendencia de contracción se acentuó. El volumen de transacciones cayó otro 56 % respecto a 2022, situando el volumen anual por debajo de los niveles de 2020 [31]. Además, el valor total descendió hasta \$723 millones, un 61 % menos que en 2022, y el precio medio se situó en torno a \$6,5/t [31]. Este ajuste refleja una “pausa” en la demanda voluntaria, condicionada por la espera de nuevas reglas de integridad (ICVCM, VCMI) y por el creciente escrutinio mediático sobre ciertos proyectos [31].

No obstante, esta fase de depuración también está dando lugar a un mercado más maduro y exigente, donde los compradores priorizan proyectos de mayor calidad, con beneficios sociales y ambientales adicionales, frente a otros de baja adicionalidad o impacto discutible.

De cara al futuro, se estima que el mercado podría volver a crecer de forma significativa si las reformas en curso logran restaurar la confianza. BloombergNEF prevé que la demanda podría alcanzar las 1.000 millones de toneladas anuales en 2030 y hasta 2.500 millones en 2050 [32], lo que implicaría un mercado valorado en decenas de miles de millones de dólares, siempre que se resuelvan los desafíos de calidad y trazabilidad [33].

4.1.5 Proporción del mercado voluntario en relación con el mercado total

En cuanto a la proporción del mercado voluntario en relación con el mercado total, a nivel europeo por ejemplo, el EU ETS (mercado de emisiones de la Unión Europea) registró en 2022 un volumen negociado de €751.000 millones (unos \$780.000 millones), equivalente al 87 % del valor de todos los mercados de carbono regulados a nivel mundial [29]. En contraste, como hemos visto en la sección anterior, ese mismo año el mercado voluntario global apenas rondó los \$1.800-\$2.000 millones [30]. Esta enorme brecha implica que la actividad voluntaria fue del orden de ~0,2 % del mercado total en valor.

En términos de volumen de CO₂, la diferencia también es marcada: se estima que las transacciones voluntarias alcanzaron alrededor de 500 millones de toneladas en 2021 [30], mientras que los mercados regulados cubrieron varios gigatoneladas (por ejemplo, solo el EU ETS cubre ~1,5 GtCO₂ anuales [29]). Esto significa que las compensaciones voluntarias representaron apenas el equivalente a unos pocos días de emisiones globales [30], es decir, menos del 1 % de las emisiones anuales, evidenciando su escala modesta frente a los esquemas obligatorios.

En síntesis, el mercado voluntario hoy es muy pequeño en comparación con los sistemas regulato-

rios. No obstante, su importancia cualitativa radica en canalizar financiación climática adicional y en cubrir fuentes de emisiones o proyectos que los marcos obligatorios no alcanzan. Se espera además un posible crecimiento futuro de los voluntarios a medida que más empresas asuman compromisos neto-cero, aunque este crecimiento dependerá de su credibilidad e integración con los marcos internacionales (ver sección de evolución y proyecciones más adelante).

4.2 Tamaño y Estructura del Mercado de Créditos de Carbono Voluntario

Como hemos explicado en el capítulo anterior, a diferencia de los mercados regulados, que se basan en obligaciones legales impuestas por gobiernos, los mercados voluntarios de carbono (VCM) operan bajo un esquema de autorregulación institucionalizada, liderado por estándares privados que actúan como “cuasi-reguladores”. Estos estándares establecen metodologías, verifican la integridad ambiental de los proyectos, emiten los créditos y mantienen registros públicos para evitar doble contabilización.

Los cinco principales estándares —que concentran alrededor del 98 % del mercado voluntario global— son:

- **Verra – Verified Carbon Standard (VCS):** Es el programa más grande del mercado, responsable de más del 70 % de los créditos emitidos anualmente [34]. Solo en 2021, emitió más de 295 millones de VCUs mediante aproximadamente 1.800 proyectos [35]. Administra múltiples tipos de proyectos (forestales, residuos, energía, etc.) y recientemente ha implementado reformas para alinearse con los principios de integridad definidos por el ICVCM [36].
- **Gold Standard (GS):** Fundado en 2003 por WWF, es el segundo estándar en relevancia. Certifica proyectos con co-beneficios sociales y ambientales, como acceso a energía limpia o agua potable. Emitió unos 44 millones de créditos en 2021 (alrededor del 15 % del total) [35], y su énfasis en la contribución a los ODS lo posiciona como referente en calidad adicional [30].
- **American Carbon Registry (ACR):** Fundado en 1996 y gestionado por Winrock International, está especializado en América y fue uno de los primeros estándares aprobados para programas como CORSIA [35]. Emitió unos 9 millones de créditos en 2021.
- **Climate Action Reserve (CAR):** Iniciado en California, se centra en proyectos de Norteamérica. Sus metodologías han sido adoptadas por programas de cumplimiento en EE. UU. y algunos créditos pueden interoperar con el estándar VCS de Verra [35].

- **Architecture for REDD+ Transactions (ART)**: Estándar específico para proyectos REDD+ jurisdiccionales (a nivel país o región), con su metodología TREES. Aunque su volumen es menor, ha ganado relevancia al ser adoptado por iniciativas como la Coalición LEAF, y ha sido reconocido como estándar de alta integridad por el ICVCM [36].

Estas organizaciones, todas independientes y sin fines de lucro, no pertenecen a gobiernos, sino que obtienen legitimidad de la confianza del mercado. Su rol es garantizar la calidad ambiental de los créditos emitidos, mediante auditorías de terceros, validación metodológica y publicación de registros transparentes [37].

Iniciativas de integridad y gobernanza Frente a las crecientes críticas sobre la calidad variable de los créditos, se han creado iniciativas meta-regulatorias para reforzar la integridad del mercado voluntario:

- El **Integrity Council for the Voluntary Carbon Market (ICVCM)**, surgido de la Taskforce on Scaling Voluntary Carbon Markets, ha establecido los *Core Carbon Principles* (CCPs) para estandarizar criterios de calidad. Verra, Gold Standard, ART, ACR y CAR han sido aprobados como *CCP-Eligible*, lo que permite etiquetar créditos de “alta integridad” si también utilizan metodologías verificadas [36].
- La **Voluntary Carbon Markets Integrity Initiative (VCMI)** lanzó en 2023 un *Claims Code* para regular las declaraciones públicas de neutralidad climática por parte de empresas. Este código establece cuándo y cómo pueden utilizarse los créditos para respaldar afirmaciones de “carbono neutral”, reduciendo riesgos de *greenwashing* [31].

Conexión con marcos regulatorios Aunque los mercados voluntarios nacieron al margen de los sistemas estatales, su integración con marcos regulatorios está aumentando. El programa **CORSIA** de la OACI ya acepta créditos de estándares voluntarios (Verra, GS, ACR, CAR, ART) como unidades de cumplimiento en el sector aéreo [38]. Además, el **Artículo 6 del Acuerdo de París** podría tener un impacto significativo en el futuro de estos mercados: muchos países están evaluando si autorizar créditos voluntarios para que cuenten como contribuciones nacionales. Esto implicaría aplicar ajustes contables para evitar doble conteo internacional, lo que refuerza la institucionalización progresiva del mercado voluntario [36].

En conjunto, los estándares voluntarios están transitando hacia un entorno de gobernanza más robusto, con mecanismos de acreditación, trazabilidad y supervisión externa, sin perder su

carácter privado y no obligatorio. Este proceso será clave para asegurar su credibilidad y rol complementario frente a los mercados regulados en la transición climática global.

5 SISTEMA DE EMISIONES DE LA UE (EU ETS)

El Sistema de Comercio de Emisiones de la Unión Europea (EU ETS) constituye el pilar central de la política climática europea y representa el mercado de carbono regulado más ambicioso, consolidado y extenso del mundo. Desde su puesta en marcha en 2005, ha evolucionado hacia un sistema sofisticado que combina señales de precio con límites estrictos de emisiones, abarcando sectores clave como la industria, la energía, la aviación y, más recientemente, el transporte marítimo. En esta sección se analiza en profundidad su estructura, funcionamiento, evolución del precio del carbono y la eficacia del sistema mediante un análisis económico riguroso, con el objetivo de comprender su papel como instrumento para la descarbonización progresiva de la economía europea.

5.1 Estructura y Funcionamiento del EU ETS

Habiendo introducido de forma general los distintos mercados regulados a nivel mundial en el capítulo anterior, pasamos a analizar más en detalle el Régimen de Comercio de Derechos de Emisión de la Unión Europea (EU ETS, por sus siglas en inglés), el primer gran mercado regulado de carbono a nivel mundial y actualmente el más relevante por su valor de mercado y volumen operado [2]. Este sistema afecta a más de 10.000 instalaciones industriales y operadores aéreos dentro de los Estados Miembros de la UE, cubriendo aproximadamente el 40 % de las emisiones totales de gases de efecto invernadero (GEI) del bloque comunitario [7].

El funcionamiento del EU ETS se basa en un principio clave: se establece un límite máximo o *cap* a la cantidad total de emisiones permitidas para los sectores cubiertos entre los 27 estados miembros, el cual se reduce progresivamente cada año para fomentar la descarbonización de la economía europea [2]. Este límite garantiza que las emisiones se mantengan dentro de los objetivos fijados por la UE, como parte de su Pacto Verde y la Ley Climática Europea, que busca reducir las emisiones un 62 % para 2030 vs. 2005 (respecto al 42 % anterior) [7].

Dentro de este sistema, las empresas deben disponer de suficientes derechos de emisión (EUAs) para cubrir sus emisiones anuales. Estos derechos pueden obtenerse de dos formas: mediante subastas públicas o mediante asignaciones gratuitas que la UE concede a determinados sectores considerados en riesgo de fuga de carbono, es decir, aquellos expuestos a la competencia internacional y con riesgo de deslocalización [7]. No obstante, la asignación gratuita de derechos se eliminará progresivamente, con el objetivo de desaparecer en 2034, siendo sustituida por un Mecanismo de Ajuste en Frontera del Carbono (CBAM) que igualará el coste del carbono entre productores europeos e importados [7].

Además, los Estados miembros de la UE están obligados a destinar el 100 % de los ingresos obtenidos de las subastas de derechos a políticas relacionadas con el clima, como inversiones en energías renovables o proyectos de eficiencia energética [2].

El EU ETS también ha ampliado su alcance a nuevos sectores. Desde 2022, se incluye el sector marítimo, y está prevista la creación de un EU ETS 2 en 2027 o 2028, que incluirá a los suministradores de combustibles fósiles utilizados en transporte, edificación y calefacción industrial [7].

Desde su creación, el EU ETS ha logrado reducir las emisiones de GEI de los sectores que cubre en un 41 %, siendo considerado un instrumento clave en la política climática europea y una referencia internacional en la lucha contra el cambio climático [7].

5.2 Evolución del Precio del Carbono en el EU ETS

Además, cabe destacar la evolución del precio del carbono dentro del EU ETS, que ha experimentado un crecimiento sostenido en los últimos años. Este aumento se debe a un diseño de mercado que busca que contaminar resulte cada vez más caro, incentivando así la reducción de emisiones. A finales de 2022, el precio por tonelada de CO₂ superaba los 90 euros, muy por encima de los niveles previos a la pandemia, cuando rondaba los 20 euros [2].



Figura 14: Evolución del precio de los permisos de carbono (EU ETS) entre 2015 y 2025. Fuente: Trading Economics [8].

La Figura 14 refleja la evolución del precio del carbono en el sistema EU ETS desde 2015 hasta 2025. Se observa un incremento sostenido especialmente desde 2018, alcanzando picos cercanos a los 100 €/tCO₂e en 2022. Esta evolución es clave para entender las dinámicas de oferta y demanda dentro del mercado regulado de carbono y el impacto de las políticas climáticas europeas. El precio del carbono actúa como un incentivo directo para que las empresas reduzcan sus emisiones, ya que cuanto mayor es el precio, mayor es el coste asociado a contaminar.

5.3 Análisis Económico del Mercado EU ETS

Con el objetivo de analizar las dinámicas económicas que explican la evolución de las emisiones de CO₂ dentro del EU ETS, se ha desarrollado un análisis econométrico basado en modelos de regresión lineal múltiple (OLS, *Ordinary Least Squares*).

Este análisis permite cuantificar de manera rigurosa el impacto de diversas variables económicas y estructurales sobre las emisiones verificadas, aportando evidencia empírica sobre los principales determinantes de su dinámica.

Los datos utilizados han sido obtenidos de fuentes oficiales reconocidas:

- Emisiones verificadas y derechos de emisión asignados: European Environment Agency (EEA) - Emissions Trading Viewer ¹.
- Variables macroeconómicas (PIB, intensidad energética, empleo e inversión): Eurostat ².
- Precio del carbono: World Bank Carbon Pricing Dashboard ³.

En cuanto al tratamiento de los datos, no ha sido necesaria una limpieza adicional, pero sí una transformación para trabajar en términos relativos. En concreto:

- Emisiones verificadas, derechos de emisión asignados e inversión han sido normalizados dividiéndolos entre el PIB nominal de cada año.
- La intensidad energética se expresa de forma relativa al PIB (kilogramos de equivalente de petróleo por unidad de PIB en paridad de poder adquisitivo).
- La tasa de empleo (*Employment*) y el precio del carbono (*Carbon Price*) se han mantenido en valores absolutos, dado que:

¹[39]

²[40]

³[6]

- La tasa de empleo refleja el porcentaje de la población activa ocupada, por lo que ya es un ratio relativo y no requiere normalización adicional.
- El precio del carbono representa el valor monetario en euros por tonelada de CO₂ emitida, una magnitud unitaria que tampoco necesita ajuste en función del PIB.

Así, se parte de la hipótesis de que las emisiones verificadas de CO₂ están condicionadas por factores como:

- El precio del carbono en los mercados de cumplimiento.
- La intensidad energética del sistema productivo.
- El nivel de empleo agregado.
- La inversión en formación bruta de capital fijo relativa al PIB.

A partir de estas variables, en las secciones siguientes se desarrollarán distintos modelos de regresión lineal múltiple (OLS), progresivamente ajustados y depurados mediante técnicas estadísticas como el Análisis de Componentes Principales (PCA), para identificar los determinantes más relevantes de la dinámica de emisiones en el EU ETS.

5.3.1 Análisis Exploratorio de las Variables

Previo a la estimación de los modelos de regresión, se ha realizado un análisis exploratorio con el objetivo de estudiar la relación entre las variables económicas consideradas y las emisiones de CO₂.

En primer lugar, la Figura 15 muestra la matriz de correlaciones entre las variables relativas al PIB consideradas en el análisis.

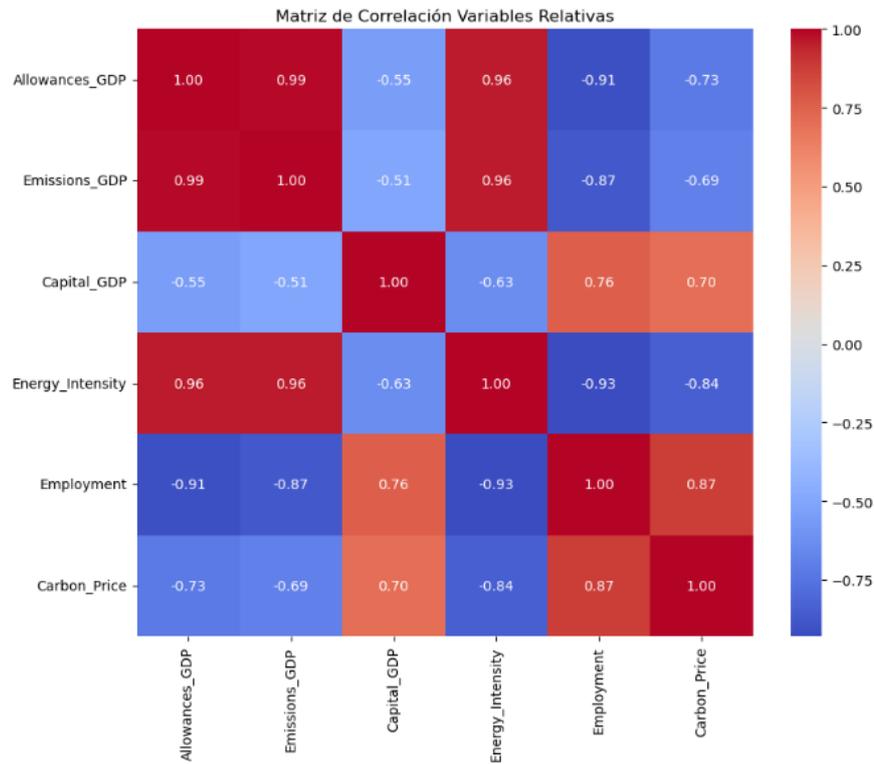


Figura 15: Matriz de correlación entre variables relativas. Fuente: Elaboración propia.

Se observa que existe una alta correlación positiva entre *Allowances_GDP* y *Emissions_GDP* ($r = 0,99$), así como entre *Energy Intensity* y *Emissions_GDP* ($r = 0,96$). También se identifican correlaciones negativas elevadas entre *Energy Intensity* y *Employment* ($r = -0,93$) y entre *Energy Intensity* y *Carbon Price* ($r = -0,84$). Estos resultados sugieren la presencia de posibles problemas de multicolinealidad.

Adicionalmente, se han generado gráficos de dispersión (*pairplot*) para visualizar la relación entre todas las variables consideradas (Figura 16). Estos gráficos permiten identificar patrones no lineales y posibles outliers.

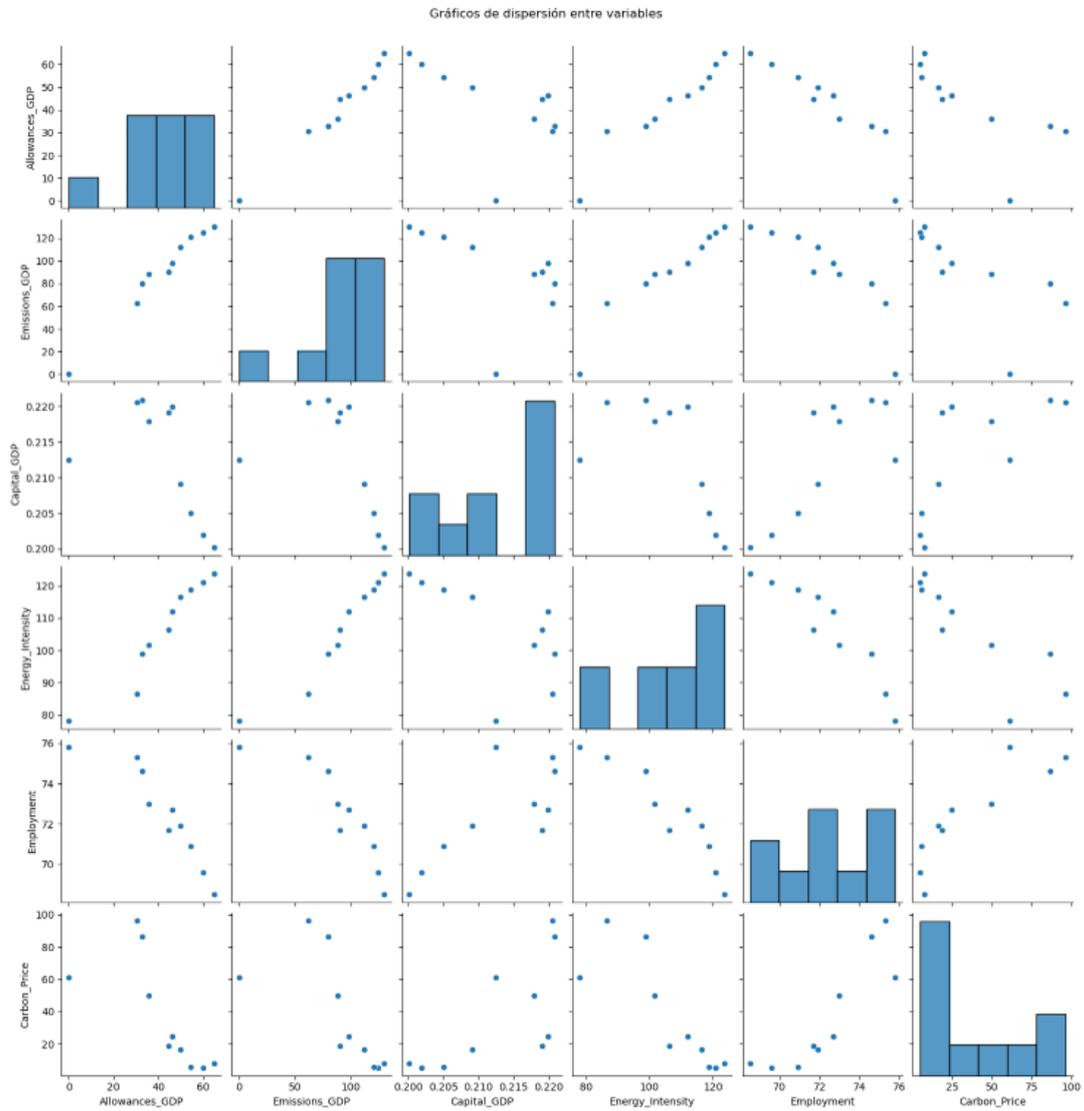


Figura 16: Gráficos de dispersión entre variables relativas. Fuente: Elaboración propia.

Los gráficos de dispersión muestran relaciones positivas claras entre *Allowances_GDP*, *Emissions_GDP* y *Energy Intensity*, así como una tendencia decreciente en la relación entre *Energy Intensity* y *Employment*.

Finalmente, para analizar formalmente la existencia de multicolinealidad, se ha calculado el *Variance Inflation Factor* (VIF) para cada variable independiente incluida en el modelo. Los resultados se recogen en la Tabla 1.

Tabla 1: Análisis de Multicolinealidad: Factores VIF

| Variable | VIF |
|------------------|------------|
| Carbon_Price | 4.50 |
| Energy_Intensity | 8.75 |
| Employment | 13.03 |
| Capital_GDP | 2.77 |

Se aprecia que *Employment* presenta un VIF superior a 10, indicando una multicolinealidad severa que puede afectar a la estabilidad de los coeficientes estimados. Asimismo, *Energy Intensity* muestra también un VIF elevado (8.75), cercano al umbral crítico de 10.

Estos resultados justifican la posterior implementación de técnicas de reducción de la dimensionalidad, como el Análisis de Componentes Principales (PCA), para mejorar la robustez de la estimación.

5.3.2 Análisis de Componentes Principales (PCA)

Ante la presencia de una elevada multicolinealidad entre las variables explicativas, evidenciada en la matriz de correlación, se ha considerado necesario aplicar un Análisis de Componentes Principales (PCA).

El objetivo principal del PCA es transformar las variables originales —altamente correlacionadas entre sí— en un nuevo conjunto reducido de variables (componentes principales) que sean ortogonales, es decir, no correlacionadas, permitiendo así resolver los problemas de colinealidad y mejorar la robustez de las estimaciones econométricas.

Además, esta metodología permite sintetizar la información contenida en las variables originales, preservando el máximo nivel de varianza explicada posible.

La Figura 17 muestra el Scree Plot resultante del PCA, donde se observa que las dos primeras componentes principales permiten capturar más del 95 % de la varianza total del sistema.

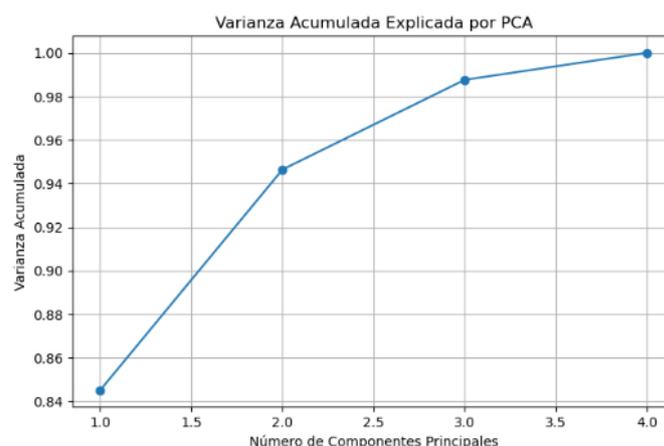


Figura 17: Scree Plot - Varianza explicada acumulada por el PCA. Fuente: Elaboración propia.

En base a este resultado, se han retenido las dos primeras componentes principales para la especificación final del modelo econométrico. La composición de estas componentes, resultado de la combinación lineal de las variables originales, se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2: Matriz de Loadings - Composición de las Componentes Principales. Fuente: Elaboración propia.

| Variable | PCA1 | PCA2 | PCA3 | PCA4 |
|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Carbon_Price | 0.507271 | 0.182506 | -0.848012 | 0.049023 |
| Energy_Intensity | -0.506821 | -0.452138 | -0.438239 | -0.588771 |
| Employment | 0.529455 | 0.131333 | 0.302358 | -0.781670 |
| Capital_GDP | 0.453306 | -0.863142 | 0.097783 | 0.199843 |

Se observa que:

- La **Componente Principal 1 (PCA1)** está asociada principalmente al precio del carbono (*Carbon Price*), la tasa de empleo (*Employment*) y la inversión relativa (*Capital_GDP*), todas ellas con pesos positivos y similares, capturando un patrón común de crecimiento económico y fortalecimiento de la actividad productiva.
- La **Componente Principal 2 (PCA2)** recoge fundamentalmente la información de la intensidad energética (*Energy Intensity*) y de la inversión relativa (*Capital_GDP*), reflejando una dimensión distinta asociada a la eficiencia energética y los procesos de modernización.

Para facilitar la interpretación visual de estas relaciones, se ha elaborado un biplot (Figura 18), que representa simultáneamente:

- Las observaciones (años del periodo analizado) en el nuevo espacio generado por PCA1 y PCA2.
- La dirección e intensidad de las variables originales, representadas mediante vectores.

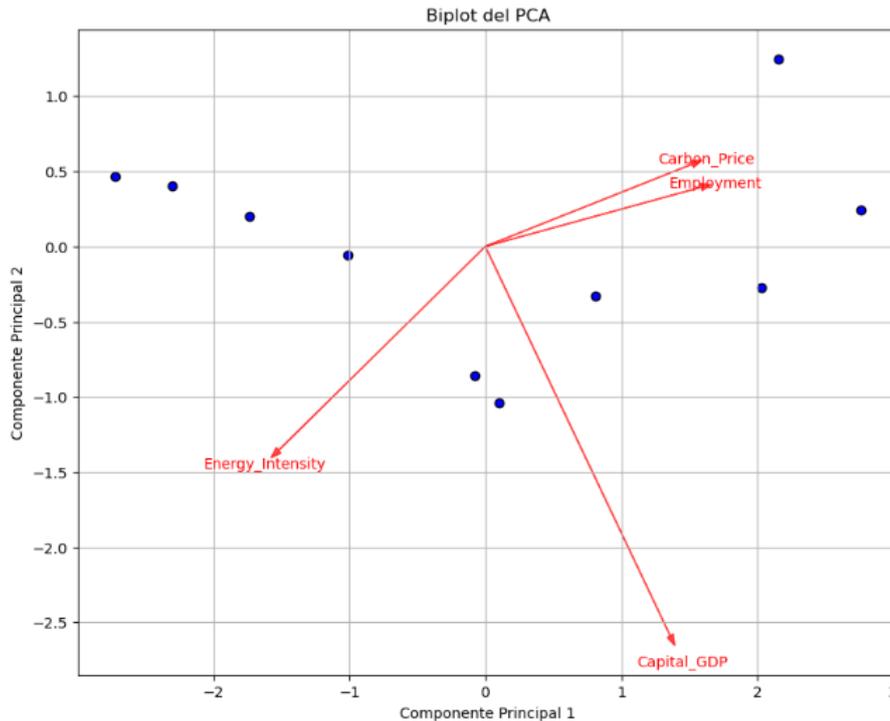


Figura 18: Biplot - Relación entre Variables Originales y Componentes Principales. Fuente: Elaboración propia.

Este gráfico permite visualizar cómo las variables relacionadas con la actividad económica (precio del carbono, tasa de empleo e inversión relativa) se agrupan en torno a la primera componente principal (PCA1), mientras que la intensidad energética se encuentra orientada hacia la segunda componente (PCA2), reflejando comportamientos diferenciados respecto a los patrones de crecimiento económico.

Finalmente, la Figura 19 presenta de manera gráfica los pesos de cada variable en los cuatro componentes principales.

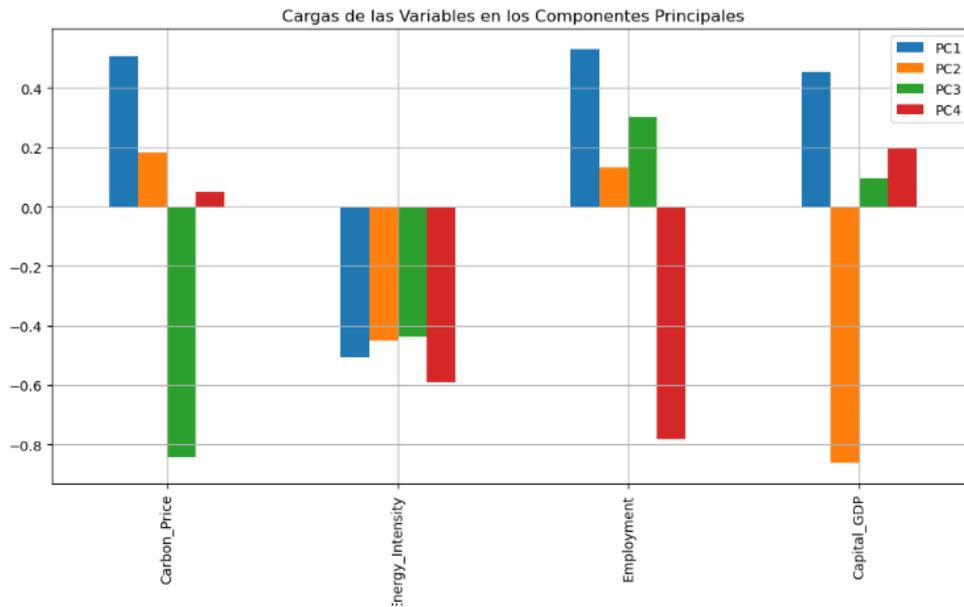


Figura 19: Cargas de las Variables en los Componentes Principales. Fuente: Elaboración propia.

Esta transformación mediante PCA permite simplificar el modelo de regresión posterior, reduciendo el número de variables explicativas, eliminando la multicolinealidad y preservando la mayor parte de la varianza contenida en los datos originales.

5.3.3 Modelo Econométrico OLS

Con el objetivo de explicar la evolución de las emisiones de CO₂ dentro del EU ETS, se han estimado diversos modelos de regresión lineal múltiple (OLS, *Ordinary Least Squares*) utilizando las variables económicas consideradas.

Inicialmente, se realizaron tres especificaciones progresivas:

- **Modelo 1:** Precio del carbono (*Carbon Price*).
- **Modelo 2:** Precio del carbono e intensidad energética (*Energy Intensity*).
- **Modelo 3:** Precio del carbono, intensidad energética, tasa de empleo (*Employment*) e inversión relativa (*Capital_GDP*).

Las ecuaciones econométricas correspondientes a cada modelo son las siguientes:

Modelo 1:

$$Emissions_GDP_t = \beta_0 + \beta_1 Carbon_Price_t + \epsilon_t \quad (1)$$

Modelo 2:

$$Emissions_GDP_t = \beta_0 + \beta_1 Carbon_Price_t + \beta_2 Energy_Intensity_t + \epsilon_t \quad (2)$$

Modelo 3:

$$Emissions_GDP_t = \beta_0 + \beta_1 Carbon_Price_t + \beta_2 Energy_Intensity_t + \beta_3 Employment_t + \beta_4 Capital_GDP_t + \epsilon_t \quad (3)$$

Estos modelos evidenciaron que, si bien el poder explicativo (R^2) mejoraba al incluir más variables, también surgía un problema grave de multicolinealidad, tal y como reflejaba el análisis de VIF y la matriz de correlaciones.

Ante esta situación, se optó por aplicar un Análisis de Componentes Principales (PCA), que permitió transformar las variables originales en componentes ortogonales no correlacionadas, resolviendo el problema de multicolinealidad.

A partir de las dos primeras componentes principales (PCA1 y PCA2), se estimó la especificación final del modelo:

Modelo 4 (tras aplicar PCA):

$$Emissions_GDP_t = \beta_0 + \beta_1 PCA1_t + \beta_2 PCA2_t + \epsilon_t \quad (4)$$

Donde:

- $Emissions_GDP_t$ = Emisiones verificadas de CO₂ relativas al PIB en el año t .
- $Carbon_Price_t$ = Precio del carbono.
- $Energy_Intensity_t$ = Intensidad energética del sistema productivo.
- $Employment_t$ = Tasa de empleo.
- $Capital_GDP_t$ = Inversión de capital relativa al PIB.
- $PCA1_t, PCA2_t$ = Primeras componentes principales derivadas del PCA.
- ϵ_t = Término de error aleatorio.

Comparativa de los Modelos La Tabla 3 resume los principales resultados obtenidos para los cuatro modelos estimados:

Tabla 3: Resultados de los Modelos de Regresión OLS

| Variable | Modelo 1 | Modelo 2 | Modelo 3 | Modelo 4 (PCA) |
|-------------------------|----------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|
| Constante | 119.49*** (14.14) | -275.27*** (38.99) | -30.15 (294.60) | 90.61*** (5.69) |
| Carbon_Price | -0.78** (0.29) | 0.45** (0.14) | 0.47** (0.17) | |
| Energy_Intensity | | 3.28*** (0.32) | 2.84*** (0.52) | |
| Employment | | | -4.62 (4.07) | |
| Capital_GDP | | | 637.22 (552.35) | |
| PCA1 | | | | -16.46*** (3.09) |
| PCA2 | | | | -21.41** (8.94) |
| Observaciones | 10 | 10 | 10 | 10 |
| R ² | 0.479 | 0.967 | 0.975 | 0.829 |
| R ² ajustado | 0.414 | 0.958 | 0.956 | 0.781 |

Notas: ***p<0.01, **p<0.05, *p<0.1

Interpretación de los resultados

La Tabla 3 presenta los resultados de cuatro modelos de regresión lineal estimados mediante Mínimos Cuadrados Ordinarios (OLS), incluyendo una especificación basada en Componentes Principales (PCA). A continuación, se interpreta el significado de los coeficientes, errores estándar, niveles de significancia, y el poder explicativo de cada modelo.

Elementos Clave de Interpretación

Para llevar a cabo la interpretación de los modelos, tenemos que tener claros cuales son los elementos clave de interpretación. En primer lugar tenemos los coeficientes, los cuales representan el efecto marginal de cada variable independiente sobre la dependiente, manteniendo constantes las demás variables. En segundo lugar, el error estándar (este dato se encuentra entre paréntesis),

indica la precisión de los coeficientes estimados (valores altos respecto al coeficiente sugieren mayor fiabilidad). Además, la significancia estadística está representada en La Tabla 3 de la siguiente forma:

- *** $p < 0.01$: Muy significativo
- ** $p < 0.05$: Significativo
- * $p < 0.10$: Marginalmente significativo

Por último, el R^2 , es un porcentaje que representa la varianza explicada por el modelo, y el R^2 **ajustado**, corrige el R^2 por el número de variables, útil para comparar modelos con distinta cantidad de regresores.

Análisis detallado por modelo

A continuación, se explican los *outputs* de cada uno de los modelos desarrollados y se interpretan sus resultados, analizando el impacto que tiene la inclusión de nuevas variables en el coeficiente de determinación R^2 .

Modelo 1: Precio del carbono como única variable explicativa

Este modelo evalúa el efecto del Carbon_Price sobre las emisiones relativas al PIB, sin considerar otros factores estructurales.

- El coeficiente estimado es negativo y significativo (-0.78**), lo que sugiere que un aumento en el precio del carbono está asociado con una reducción de las emisiones, en línea con la teoría económica.
- Este efecto puede deberse a que precios más altos del carbono incentivan a las empresas y sectores contaminantes a adoptar tecnologías más limpias o a reducir la producción intensiva en emisiones.
- Sin embargo, el modelo no controla por variables clave que afectan a las emisiones (como eficiencia energética o estructura productiva), por lo que el coeficiente puede estar sesgado por omisión de variables relevantes.
- La capacidad explicativa es limitada ($R^2 = 0,479$), lo que indica que el precio del carbono, por sí solo, no explica adecuadamente la variación en las emisiones.

Modelo 2: Inclusión de la intensidad energética

Se incorpora *Energy_Intensity* como medida de eficiencia estructural del uso de energía en la economía.

- El coeficiente de *Carbon_Price* cambia de signo y se vuelve positivo (0.45**), y además significativo. Esto sugiere que su efecto estaba sesgado en el modelo anterior.
- El cambio de signo puede deberse a la interacción con el ciclo económico: precios del carbono más altos pueden estar asociados a contextos de mayor actividad y consumo energético, si no se controla adecuadamente por eficiencia.
- *Energy_Intensity* es positiva y altamente significativa (3.28***), lo que confirma que economías menos eficientes energéticamente tienden a emitir más CO₂.
- El modelo mejora sustancialmente en poder explicativo ($R^2 = 0,967$), lo que indica que la combinación de ambas variables captura gran parte de la varianza en emisiones.

Modelo 3: Inclusión de empleo e inversión

Se añaden las variables *Employment* y *Capital_GDP* para capturar efectos de actividad económica y esfuerzo inversor.

- El coeficiente de *Carbon_Price* se mantiene positivo (0.47), pero pierde significancia estadística, lo que indica que su efecto ya no es robusto al introducir nuevas variables.
- *Energy_Intensity* sigue siendo positiva y altamente significativa (2.84***), consolidándose como la variable con mayor poder explicativo.
- Ni *Employment* ni *Capital_GDP* son significativos, y presentan errores estándar muy elevados. Esto indica problemas de **multicolinealidad**, dificultando la interpretación individual de los efectos.
- El coeficiente de *Capital_GDP* es muy elevado (637.22), pero dada su alta varianza (552.35), la fiabilidad del resultado es baja.
- Aunque el modelo presenta un R^2 marginalmente superior (0.975), la robustez estadística y la claridad interpretativa disminuyen.

Modelo 4: Componentes Principales (PCA)

Se aplica un Análisis de Componentes Principales (PCA) para reducir la multicolinealidad y generar variables ortogonales a partir de las originales.

- Se introducen las variables PCA1 y PCA2, que capturan combinaciones latentes de las variables originales no correlacionadas entre sí.
- Ambos coeficientes son negativos y estadísticamente significativos:
 - PCA1: -16.46*** podría estar asociado a mejoras estructurales como eficiencia energética o transformación tecnológica.
 - PCA2: -21.41** podría reflejar dinámicas de inversión en sectores verdes o desaceleración de sectores emisores.
- La constante positiva (90.61***) representa el nivel estructural promedio de emisiones cuando las componentes principales toman valor cero.
- Aunque el R^2 ajustado es inferior (0.781), el modelo gana en robustez estadística al eliminar la multicolinealidad, siendo especialmente útil para predicción.
- La principal limitación es la pérdida de interpretabilidad económica directa de los regresores.

Modelo 3: Inclusión de empleo e inversión

- Este modelo añade `Employment` y `Capital_GDP`, buscando capturar dimensiones de actividad productiva y esfuerzo inversor.
- El coeficiente de `Carbon_Price` se mantiene positivo y significativo (0.47**), lo que refuerza la idea de que, una vez controladas otras condiciones estructurales, su efecto estimado no implica necesariamente una reducción directa de emisiones.
- `Energy_Intensity` se mantiene positivo y altamente significativo (2.84***), confirmando su papel dominante.
- Ni `Employment` ni `Capital_GDP` resultan significativos, y sus errores estándar son muy elevados. Esto indica presencia de **multicolinealidad**, es decir, correlaciones elevadas entre las variables explicativas que dificultan identificar efectos independientes.

- Capital_GDP , en particular, muestra un coeficiente positivo alto (637.22), que podría interpretarse como que mayores niveles de inversión en capital físico intensivo pueden incrementar emisiones si no van acompañados de mejoras tecnológicas. Sin embargo, la alta varianza reduce la fiabilidad de esta inferencia.
- El R^2 es ligeramente superior (0.975), pero el *trade-off* con interpretabilidad y robustez es alto. El modelo pierde claridad causal.

Modelo 4: Componentes Principales (PCA)

- Para abordar los problemas de multicolinealidad del Modelo 3, se aplica un Análisis de Componentes Principales (PCA), que genera variables ortogonales (no correlacionadas) combinando las originales.
- PCA1 y PCA2 capturan dimensiones latentes del sistema económico que afectan a las emisiones.
- Ambos coeficientes son negativos y significativos:
 - PCA1: -16.46*** sugiere que este componente podría estar dominado por mejoras en eficiencia energética o cambios estructurales que reducen emisiones.
 - PCA2: -21.41** posiblemente capta una combinación de desaceleración económica e inversión descarbonizante.
- La constante positiva (90.61***) recoge el nivel medio de emisiones estructurales.
- Aunque el R^2 ajustado es más bajo (0.781), este modelo ofrece la mayor robustez metodológica al eliminar interferencias entre regresores.
- Este modelo es particularmente útil para predicción y robustez estadística, aunque menos interpretativo desde el punto de vista económico.

5.3.4 Conclusiones del Análisis Económico

El análisis econométrico desarrollado sobre el sistema de comercio de emisiones de la Unión Europea (EU ETS) ha permitido extraer varias conclusiones relevantes respecto al funcionamiento y efectividad de este mercado como instrumento de reducción de emisiones de CO_2 .

En primer lugar, los resultados obtenidos a partir de los modelos OLS iniciales confirman que las emisiones relativas al PIB están significativamente influenciadas por variables económicas y regulatorias como el precio del carbono y la intensidad energética. La inclusión progresiva de nuevas variables (empleo e inversión relativa) permitió mejorar el poder explicativo del modelo, pero a costa de introducir graves problemas de multicolinealidad, tal y como se evidenció en los valores elevados del VIF y en la fuerte correlación observada entre las variables explicativas.

Para abordar esta limitación, se aplicó un Análisis de Componentes Principales (PCA), que permitió transformar las variables originales en un nuevo conjunto de componentes ortogonales, eliminando la multicolinealidad y manteniendo un elevado porcentaje de varianza explicada. El modelo final basado en PCA logra explicar más del 80 % de la variabilidad observada en las emisiones, con coeficientes estadísticamente significativos y consistentes con la teoría económica.

De forma específica, se observa que:

- Un mayor precio del carbono y mejoras en la eficiencia energética (reflejadas en las componentes principales) se asocian a menores niveles de emisiones relativas al PIB.
- El crecimiento económico, medido a través de variables como la tasa de empleo y la inversión relativa, también juega un papel importante, pero su interpretación directa se ve limitada por la multicolinealidad, que fue corregida mediante PCA.
- El sistema EU ETS, en su diseño actual, parece estar consiguiendo su objetivo de inducir reducciones de emisiones de manera costo-efectiva, apoyándose tanto en incentivos de precio como en mejoras estructurales del tejido productivo.

En definitiva, el análisis realizado evidencia la importancia de contar con instrumentos de política climática basados en precios de mercado, pero también resalta la necesidad de complementar estos instrumentos con políticas de apoyo a la eficiencia energética y la modernización tecnológica, de modo que se potencie la disociación entre crecimiento económico y emisiones de carbono.

Este enfoque combinado se consolida como clave para avanzar hacia la neutralidad climática en Europa de manera eficaz y sostenible.

6 INNOVACIÓN DIGITAL EN LOS MERCADOS DE CARBONO

La transformación digital está revolucionando los mercados de carbono, introduciendo tecnologías que permiten una gestión más transparente, eficiente y escalable de los créditos de emisiones. Desde plataformas descentralizadas hasta registros interoperables y sistemas automatizados de medición y verificación, la digitalización está sentando las bases de un nuevo ecosistema climático global. Esta sección examina las principales innovaciones tecnológicas que están redefiniendo el funcionamiento de los mercados de carbono, incluyendo infraestructuras digitales, blockchain, sistemas MNV avanzados y plataformas habilitadas por el Artículo 6 del Acuerdo de París, así como los retos asociados para su plena integración y escalabilidad global.

6.1 Infraestructura Digital para la Gestión de Mercados de Carbono

La digitalización se ha convertido en un elemento clave para garantizar la transparencia, integridad y eficiencia de los mercados de carbono a nivel global. Los sistemas digitales permiten registrar y seguir con precisión cada tonelada de CO₂ reducida o eliminada, evitando errores y problemas de doble contabilización [41]. Esta infraestructura digital se basa en dos pilares principales: los registros electrónicos de emisiones y créditos de carbono, y los sistemas de Medición, Notificación y Verificación (MNV) digitales que automatizan la recogida y verificación de datos [41].

Un ejemplo destacado de innovación en esta área es el *Climate Action Data Trust* (CADT), una plataforma descentralizada impulsada por el Banco Mundial, la IETA y el Gobierno de Singapur. CADT conecta y agrega información de los principales registros de carbono del mundo, sirviendo como una capa global de metadatos que armoniza datos de distintos estándares y países, alineándose con los principios del Artículo 6 del Acuerdo de París [42]. Desde su lanzamiento a finales de 2022, CADT ya integra datos de seis grandes registros —incluyendo Verra, Global Carbon Council o el registro nacional de Bután— que representan aproximadamente el 85 % de todos los créditos de carbono emitidos a nivel mundial [41].

Además, su *dashboard* público, lanzado en 2023, permite consultar de forma estandarizada créditos de diferentes programas, facilitando la trazabilidad del ciclo de vida completo de los créditos: desde su emisión hasta su retiro final [42].

En paralelo, muchos países en desarrollo —con el apoyo de iniciativas internacionales como la Partnership for Market Implementation (PMI) del Banco Mundial— están implementando sus propios sistemas nacionales de registros y MNV digitales, con el objetivo de garantizar la

interoperabilidad con plataformas globales como CADT y facilitar su participación en mercados internacionales [41].

En definitiva, esta infraestructura digital está sentando las bases para mercados de carbono más interconectados, transparentes y eficientes, reduciendo los costes de transacción y fortaleciendo la confianza de los participantes a escala global [42].

6.2 Tecnologías Emergentes: Cadena de Bloques y Sistemas MNV (Medición, Notificación y Verificación)

Más allá de la infraestructura básica de registros y plataformas, los avances tecnológicos recientes están dando lugar a nuevos modelos de operación dentro de los mercados de carbono. En particular, destacan dos campos clave: la tokenización de créditos mediante blockchain y la digitalización avanzada de los sistemas de Medición, Notificación y Verificación (MNV), también conocido como digital MRV.

6.2.1 Aplicaciones de blockchain en los mercados de carbono

La cadena de bloques (blockchain) se ha consolidado como una tecnología emergente clave para incrementar la transparencia, trazabilidad y seguridad en los mercados de carbono. Su capacidad para registrar datos de manera distribuida e inmutable permite prevenir fraudes, evitar la doble contabilización de créditos y facilitar su comercio automatizado mediante contratos inteligentes [9, 43].

En este contexto, han surgido diversas plataformas que tokenizan créditos de carbono verificados, transformándolos en activos digitales intercambiables en mercados descentralizados. Un caso destacado es *Toucan Protocol*, que actúa como puente entre los registros tradicionales y la blockchain. Por cada crédito verificado (por ejemplo, bajo el estándar Verra) que se retira oficialmente, Toucan emite un token digital denominado TCO₂, garantizando así la equivalencia y la no duplicación entre el crédito físico y el token [43]. Además, Toucan introdujo los *Base Carbon Tonne* (BCT), tokens fungibles que agrupan múltiples créditos según criterios mínimos de calidad, mejorando la liquidez del mercado voluntario de carbono on-chain.

Sobre esta infraestructura se desarrolló *KlimaDAO*, una organización autónoma descentralizada que opera con la criptomoneda KLIMA, respaldada por créditos de carbono reales. Cada token KLIMA se emite solo si se depositan previamente créditos verificados, como los BCT, en su tesorería. Este modelo económico genera un incentivo para retirar créditos del mercado voluntario y almacenarlos como reserva digital, impulsando la demanda de créditos y elevando

su precio [44, 43]. Además, KlimaDAO ofrece herramientas como *Klima Infinity*, que permiten a empresas e individuos compensar emisiones directamente desde la blockchain, acortando drásticamente los plazos frente a los métodos tradicionales.

Según datos de la plataforma, KlimaDAO logró retirar más de 17 millones de toneladas de CO₂ en apenas un año, una cifra equivalente a las emisiones anuales de un país como Croacia, y que representó cerca del 2 % del mercado voluntario global en su pico [43]. Este impacto demuestra el potencial de las soluciones DeFi para escalar la acción climática a través de mecanismos financieros innovadores y abiertos.

Junto a Toucan y KlimaDAO, han emergido múltiples iniciativas adicionales que aplican blockchain a diversos aspectos del mercado de carbono. Moss Earth tokeniza créditos forestales en la Amazonía y los vende a empresas internacionales; Regen Network diseña su propia blockchain para créditos agrícolas y de suelos; Energy Web trabaja con certificados energéticos en redes empresariales; y consorcios como *Carbonplace*, integrados por grandes bancos, desarrollan plataformas para liquidar transacciones de carbono de forma casi instantánea [43].

Este conjunto de iniciativas forma parte del ecosistema conocido como *Regenerative Finance* (ReFi), que busca orientar las finanzas descentralizadas hacia resultados ambientales positivos. No obstante, este nuevo paradigma también enfrenta desafíos relevantes: asegurar la integridad de los créditos tokenizados, evitar la especulación excesiva o coordinar con los estándares tradicionales. Un ejemplo ilustrativo fue la decisión de Verra en 2022 de suspender temporalmente la aceptación de retiros para tokenización mientras se establecían lineamientos claros para estas operaciones [43].

La Figura 20 compara gráficamente los flujos de los mercados de carbono tradicionales y aquellos habilitados por blockchain. En los sistemas centralizados actuales, existen puntos ciegos y falta de transparencia sobre cuándo se emiten, negocian o retiran los créditos. En contraste, los sistemas basados en blockchain registran automáticamente cada verificación, fecha y transacción en un libro mayor distribuido, lo que permite un seguimiento completo del ciclo de vida del crédito y garantiza que no pueda ser revendido sin prueba de retiro. Esto elimina intermediarios innecesarios, agiliza los procesos y aporta seguridad adicional al sistema.

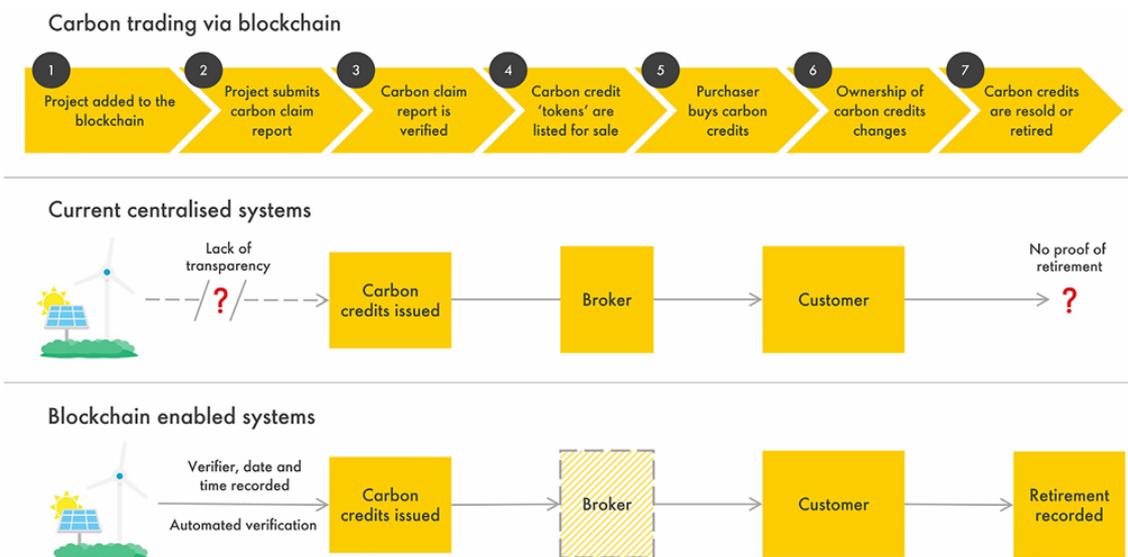


Figura 20: Comparativa entre sistemas tradicionales y basados en blockchain para la comercialización de créditos de carbono. Fuente: *carboncredits.com* [9].

6.2.2 Sistemas MNV (Medición, Notificación y Verificación) digitales

La digitalización de los sistemas de Medición, Notificación y Verificación (MNV) se está consolidando como un elemento clave para transformar los mercados de carbono y reducir las limitaciones de los procesos tradicionales, caracterizados por ser manuales, lentos y costosos [45].

Los sistemas MNV digitales (dMRV) emplean tecnologías como sensores IoT, imágenes satelitales, drones, inteligencia artificial y plataformas en la nube para automatizar la recogida, reporte y verificación de datos sobre las reducciones o absorciones de emisiones de CO₂ [45, 46]. Esto permite mejorar la fiabilidad de los datos, reducir errores humanos y acelerar la emisión de créditos de carbono [46].

Un ejemplo representativo de esta innovación es el piloto desarrollado por el Banco Mundial en Uganda, donde una aplicación móvil conectada a medidores de electricidad prepagada permite recopilar en tiempo real el consumo energético de más de un millón de hogares rurales, generando automáticamente informes de reducción de emisiones listos para ser verificados [45].

Otro caso relevante es el proyecto liderado por Gold Standard en Tailandia, que combina blockchain e IoT en instalaciones solares para capturar y verificar datos de generación renovable, con el objetivo de tokenizar posteriormente los créditos emitidos [47]. En el ámbito de las cocinas limpias, el uso de dispositivos inteligentes en estufas, junto a algoritmos de IA, permite prevalidar

métricas clave y reducir la necesidad de visitas de campo [47].

Las ventajas potenciales de estos sistemas son significativas: permiten reducir costes, ampliar el acceso a pequeños proyectos (actualmente limitados por los altos costes de verificación), habilitar una emisión de créditos más rápida y generar datasets más completos y detallados sobre las actividades de mitigación [45].

No obstante, la adopción de dMRV aún se encuentra en una fase incipiente. La mayoría de los estándares internacionales están adaptando sus metodologías para integrar estos nuevos flujos de datos, mientras que diversas iniciativas —como la Climate Chain Coalition o la InterWork Alliance— trabajan en definir protocolos comunes que aseguren la interoperabilidad y trazabilidad de los sistemas dMRV a nivel global [46].

En conclusión, los sistemas MNV digitales están sentando las bases para un nuevo paradigma en los mercados de carbono —el llamado *Carbon Market 4.0*— caracterizado por procesos más ágiles, transparentes y conectados globalmente, aunque su plena implementación requerirá tiempo, inversión y cooperación entre los distintos actores del ecosistema [46].

6.3 Visión Hacia un Mercado de Carbono Digitalizado Global

La trayectoria de digitalización en los mercados de carbono abre la puerta a una visión más ambiciosa: la construcción de un mercado global de carbono totalmente digitalizado, interconectado y transparente. Este nuevo paradigma permitiría rastrear cada tonelada de CO₂ reducida desde su origen hasta su uso final como crédito, garantizando integridad ambiental, evitando la doble contabilización y facilitando la participación de países y actores diversos en mecanismos climáticos internacionales [48].

6.3.1 Bases normativas: el Artículo 6 del Acuerdo de París

El Artículo 6 del Acuerdo de París proporciona el marco legal para un futuro mercado internacional de carbono. En particular, los apartados 6.2 y 6.4 permiten la transferencia de resultados de mitigación entre países (ITMOs), siempre que se respeten principios de transparencia, trazabilidad y ajuste contable correspondiente [48].

A diferencia del Protocolo de Kioto, el nuevo régimen no impone un sistema centralizado único, sino que permite una arquitectura descentralizada: cada Parte debe disponer de su propio sistema de registro o vincularse con uno existente. Esta flexibilidad requiere, sin embargo, asegurar compatibilidad entre sistemas nacionales para evitar inconsistencias [48].

6.3.2 Plataformas de referencia: CADT y Climate Warehouse

En este contexto, el *Climate Action Data Trust* (CADT) surge como un pilar técnico para integrar registros y plataformas diversas. CADT, impulsado por el Banco Mundial, la IETA y el Gobierno de Singapur, actúa como metaregistro descentralizado basado en blockchain. Su función es agregar datos de créditos de carbono de múltiples estándares (p.ej., Verra, Gold Standard) y facilitar su trazabilidad conforme a los principios del Artículo 6 [48].

CADT ha sido adoptado por múltiples países y estándares internacionales, y organismos como ICROA recomiendan su uso para evitar la doble contabilización [48]. Además, se han realizado pruebas de interoperabilidad con blockchains como Ethereum o Polygon en colaboración con empresas como Chainlink Labs, lo cual demuestra su potencial para vincular los mundos regulado y descentralizado [48].

6.3.3 Iniciativas multilaterales y colaboraciones público-privadas

La implementación del Artículo 6 también incluye herramientas lideradas por la UNFCCC: el registro del Mecanismo del 6.4 y una base de datos central para las transacciones bilaterales del 6.2. Ambas permitirán registrar transferencias de ITMOs de forma estandarizada y auditable por las Partes y el público [48].

Simultáneamente, se están formando alianzas público-privadas y consorcios tecnológicos para desarrollar capas de interoperabilidad y gobernanza compartida. Estas alianzas buscan garantizar que los datos transferidos sean compatibles, verificados y reconocidos por múltiples jurisdicciones.

6.3.4 Retos para la creación de un mercado global digital

Económicos y de desarrollo Muchos países en desarrollo aún carecen de capacidades tecnológicas y financiamiento para establecer registros digitales compatibles. Iniciativas como la Partnership for Market Implementation (PMI) del Banco Mundial ofrecen apoyo técnico y financiero, pero escalar estas soluciones requerirá una arquitectura de cooperación global y sostenibilidad financiera a largo plazo [48].

Políticos y de gobernanza Un mercado global del carbono plantea dilemas de soberanía, integridad ambiental y reconocimiento legal. Los países deben confiar en los datos generados

por terceros, lo que exige sistemas de gobernanza creíbles, protocolos de seguridad y reglas claras sobre quién puede emitir, transferir y reclamar créditos. También es esencial definir cómo se armonizan los mercados voluntarios y regulados bajo un mismo ecosistema digital, evitando dobles reclamaciones [48].

Técnicos y de interoperabilidad Desde un punto de vista técnico, se necesitan estándares universales de datos, APIs, oráculos y formatos comunes de identificación de créditos. La interoperabilidad entre blockchains, bases de datos gubernamentales y plataformas privadas es clave. Además, se requiere garantizar la ciberseguridad del sistema global, así como resolver la escalabilidad en redes distribuidas y la integración fluida del MRV digital con los procesos de verificación y emisión [48].

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente trabajo ha alcanzado con éxito los objetivos propuestos al inicio de la investigación. Se ha realizado un análisis exhaustivo de la evolución y estructura de los mercados de carbono, diferenciando sus vertientes reguladas y voluntarias; se ha evaluado en profundidad el funcionamiento del EU ETS a través de herramientas econométricas robustas; se ha explorado el papel transformador de la digitalización mediante tecnologías como blockchain y MRV digitales; y, finalmente, se han formulado recomendaciones estratégicas orientadas a mejorar la eficacia, transparencia e interoperabilidad de estos mecanismos en el contexto de la gobernanza climática internacional. A continuación, se presentan las principales conclusiones derivadas de este análisis, así como recomendaciones concretas para avanzar hacia mercados de carbono más integrados, eficientes y alineados con los objetivos del Acuerdo de París.

7.1 Conclusiones Principales

A lo largo de este trabajo se ha demostrado que los mercados de carbono representan una herramienta central en las políticas de mitigación climática actuales, al permitir la asignación eficiente de recursos mediante la fijación de precios al carbono. La evidencia recopilada sugiere que estos mecanismos, tanto en su versión regulada como voluntaria, han evolucionado considerablemente desde su creación, consolidándose como instrumentos clave para la descarbonización de las economías.

En particular, el caso del Sistema de Comercio de Emisiones de la Unión Europea (EU ETS) ha permitido evidenciar cómo un diseño institucional sólido, combinado con señales de precio estables, puede inducir reducciones sustanciales en las emisiones industriales. El análisis econométrico realizado ha confirmado la relación entre variables macroeconómicas y emisiones, respaldando el uso del precio del carbono como variable explicativa robusta. La aplicación del Análisis de Componentes Principales (PCA) ha permitido reducir la multicolinealidad y clarificar las interacciones entre las distintas variables.

Por otra parte, la digitalización de los mercados de carbono aparece como un eje emergente con gran potencial transformador. La adopción de tecnologías como blockchain o los sistemas digitales de medición, notificación y verificación (MRV) está permitiendo abordar retos históricos de trazabilidad, eficiencia y gobernanza. Casos como KlimaDAO y Toucan Protocol demuestran que las finanzas descentralizadas pueden contribuir a escalar la financiación climática y dinamizar los mercados voluntarios de carbono.

En conjunto, los hallazgos de esta investigación ponen de manifiesto que el avance hacia mercados de carbono más eficientes, integrados y transparentes será fundamental para alcanzar los objetivos del Acuerdo de París y acelerar la transición hacia una economía climáticamente neutra.

7.2 Recomendaciones para el Desarrollo de Mercados de Carbono

A la luz del análisis realizado, se recomienda reforzar los marcos de gobernanza de los mercados de carbono, especialmente en el ámbito voluntario, mediante criterios de calidad más exigentes, sistemas de certificación independientes y mecanismos de verificación más transparentes. También resulta fundamental fomentar la interoperabilidad entre registros y avanzar hacia una integración global de los sistemas de comercio de emisiones, en línea con lo previsto por el Artículo 6 del Acuerdo de París.

La adopción de tecnologías emergentes como blockchain o los MRV digitales debería ser incentivada, no solo por su capacidad de reducir costes operativos, sino también por su potencial para aumentar la trazabilidad, combatir el greenwashing y atraer nuevos actores a la acción climática. Asimismo, resulta clave promover la participación activa de países en desarrollo, asegurando esquemas de compensación que contemplen una transición justa y movilicen recursos hacia regiones más vulnerables.

El mercado voluntario, si bien más pequeño en escala, puede desempeñar un papel complementario relevante, especialmente en la canalización de financiación hacia proyectos con co-beneficios sociales y ambientales que escapan al ámbito de los mercados regulados. Para ello, es necesario avanzar en la estandarización, en la credibilidad de los créditos emitidos y en su posible integración con marcos regulatorios nacionales e internacionales.

7.3 Futuras Líneas de Investigación

Finalmente, esta investigación abre múltiples líneas de trabajo futuro. Resultaría interesante realizar estudios comparativos sobre la eficacia de otros sistemas ETS en diferentes contextos geográficos y regulatorios, a medida que se disponga de bases de datos más completas y estandarizadas. Asimismo, se debería profundizar en el análisis de los impactos sociales y ambientales del mercado voluntario de carbono, evaluando su alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Otro campo prometedor es el estudio del impacto de la tokenización y la digitalización de los créditos sobre la estructura del mercado, la integridad ambiental y la estabilidad financiera.

También se requieren más investigaciones sobre el diseño óptimo de sistemas de fijación de precios al carbono en contextos económicos heterogéneos, considerando su impacto distributivo y político. En suma, el desarrollo de mercados de carbono efectivos, equitativos y transparentes seguirá siendo un campo estratégico de investigación y acción en las próximas décadas.

Referencias Bibliográficas

- [1] O. W. in Data, “Co emissions,” 2024, accessed: 2024-11-06. [Online]. Available: <https://ourworldindata.org/co2-emissions>
- [2] N. Torres, “Mercados de carbono: alcances y desafíos para afrontar el cambio climático,” *Derecho Público Económico*, vol. 03, 06 2023.
- [3] N. James and M. Menzies, “Global and regional changes in carbon dioxide emissions: 1970-2019,” *arXiv*, vol. 2201, no. 13075v2, November 2022, [physics.soc-ph]. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2201.13075>
- [4] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO), “Guía práctica para el cálculo de la huella de carbono,” 2024, accessed: 2024-11-06. [Online]. Available: https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/guia_huella_carbono_tcm30-479093.pdf
- [5] CSR Consulting, “Los 3 alcances para el cálculo de huella de carbono: ¿cuáles son y por qué son importantes?” January 2023, accessed: 2024-02-08. [Online]. Available: https://www.csrconsulting.com.mx/2023/01/18/los-3-alcances-para-el-calculo-de-huella-de-carbono-cuales-son-y-por-que-son-importantes/?utm_source=chatgpt.com
- [6] World Bank, “Carbon pricing dashboard - compliance carbon prices,” 2025, accessed: April 13, 2025. [Online]. Available: <https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/compliance/price>
- [7] Iberdrola, “¿cómo se regulan los mercados de derechos de emisión y créditos de carbono?” 2024, accessed: 2024-11-06. [Online]. Available: <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/medio-ambiente/gestion-medioambiental/mercados-carbono-derechos-emision-co2>
- [8] Trading Economics, “Carbon - eu ets - european carbon allowances,” 2024, accedido el 13 de abril de 2025. [Online]. Available: <https://tradingeconomics.com/commodity/carbon>
- [9] A. Siphthorpe, S. Brink, T. Van Leeuwen, and I. Staffell, “Blockchain solutions for carbon markets are nearing maturity,” *One Earth*, vol. 5, no. 7, pp. 779–791, Jul. 2022.
- [10] European Union, “The polluter pays principle and environmental liability,” 2023, accessed: 2025-04-12. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/ES/legal-content/summary/the-polluter-pays-principle-and-environmental-liability.html>

- [11] D. Kong, X. Yang, and J. Xu, “Energy price and cost induced innovation: Evidence from china,” *Energy (Oxf.)*, vol. 192, no. 116586, p. 116586, Feb. 2020.
- [12] K. Gillingham and J. H. Stock, “The cost of reducing greenhouse gas emissions,” *Journal of Economic Perspectives*, vol. 32, no. 4, pp. 53–72, 2018.
- [13] R. Martin, M. Muûls, and U. J. Wagner, “The impact of the eu ets on regulated firms: What is the evidence after ten years?” *Review of Environmental Economics and Policy*, vol. 10, no. 1, pp. 129–148, 2016, accessed: 2025-04-17. [Online]. Available: <https://madoc.bib.uni-mannheim.de/40180/1/Martin-Muu%CC%82ls-Wagner-Final.pdf>
- [14] M. Cames, R. O. Harthan, J. Füssler, M. Lazarus, C. M. Lee, P. Erickson, and R. Spalding-Fecher, “How additional is the clean development mechanism? analysis of the application of current tools and proposed alternatives,” Öko-Institut e.V., Berlin, Tech. Rep., Mar. 2016, study prepared for DG CLIMA, Reference: CLIMA.B.3/SERI2013/0026r. Accessed: 2025-04-17. [Online]. Available: https://climate.ec.europa.eu/system/files/2017-04/clean_dev_mechanism_en.pdf
- [15] R. Spalding-Fecher, “Ensuring the environmental integrity of new market mechanisms,” Presentation, 2016, with contributions from François Sammut, Derik Broekhoff, Jürg Füssler, Noémie Klein, Michael Lazarus and Lambert Schneider. [Online]. Available: <https://carbonmarketwatch.org/wp-content/uploads/2016/10/Art-6-and-Env-Integrity-rev2.pdf>
- [16] G. Zhang, S. C.-I. Chen, and X. Yue, “Blockchain technology in carbon trading markets: Impacts, benefits, and challenges—a case study of the shanghai environment and energy exchange,” *Energies*, vol. 17, no. 13, p. 3296, Jul. 2024.
- [17] M. Schletz, A. Constant, A. Hsu, S. Schillebeeckx, R. Beck, and M. Wainstein, “Blockchain and regenerative finance: charting a path toward regeneration,” *Front. Blockchain*, vol. 6, Jul. 2023.
- [18] M. Álvarez Fernández, “El papel de los mercados de carbono en la mitigación del cambio climático,” *PTU Derecho Administrativo, Universidad de Oviedo*, s.f.
- [19] N. Durrani, A. Raziq, T. Mahmood, and M. Khan, “Barriers to adaptation of environmental sustainability in smes: A qualitative study,” *PLoS ONE*, vol. 19, no. 5, p. e0298580, 2024.
- [20] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO), “El proceso internacional de lucha contra el cambio climático - naciones

- unidas: Mercados de carbono,” 2024, accessed: 2024-11-06. [Online]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/el-proceso-internacional-de-lucha-contr-el-cambio-climatico/naciones-unidas/mercadoscarbono.html>
- [21] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, “Contexto de los mercados de carbono,” 2024, accessed: 2024-11-06. [Online]. Available: <https://www.minambiente.gov.co/mercados-de-carbono/contexto-mercados-de-carbono/>
- [22] B. Mundial, “Los ingresos globales provenientes de la fijación del precio del carbono alcanzan la cifra récord de USD 100 000 millones,” <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2024/05/21/global-carbon-pricing-revenues-top-a-record-100-billion>, May 2024, accessed: 2024-11-6.
- [23] Forest Peoples Programme, “Introducción a los mercados de carbono,” 2024, accessed: 2024-11-06. [Online]. Available: <https://www.forestpeoples.org/sites/default/files/documents/ES%20-%2002%20Introduccio%CC%81n%20a%20los%20mercados%20de%20carbono.pdf>
- [24] FAO, “Acción climática: Áreas de acción en las negociaciones climáticas,” 2024, accessed: 2024-11-06. [Online]. Available: <https://www.fao.org/climate-change/action-areas/climate-negotiations/es>
- [25] C. Ludeña, C. de Miguel, and A. Schuschny, “Cambio climático y mercados de carbono: repercusiones para los países en desarrollo,” *Revista CEPAL*, vol. 116, August 2015, accessed: 2024-11-06. [Online]. Available: <https://centroderecursos.cultura.pe/sites/default/files/rb/pdf/cambios%20climatico%20y%20mercado%20de%20carbono.pdf>
- [26] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO), “Mecanismos de flexibilidad del protocolo de kioto,” 2024, accessed: 2024-11-06. [Online]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/energia/estrategia-normativa/desarrollo/medio-ambiente/cambio-climatico/mecanismo-flexibilidad-protocolo-kioto.html>
- [27] National Geographic España, “¿qué es y cómo medir la huella de carbono?” 2024, accessed: 2024-11-06. [Online]. Available: <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/huella-carbono-que-es-como-se-mide>
- [28] SINCEO2, “Análisis de ciclo de vida (acv): Energía y cambio climático,” 2024, accessed: 2024-11-06. [Online]. Available: https://www.sinceo2.com/servicios/energia-cambio-climatico/analisis-ciclo-vida/?utm_source=chatgpt.com

- [29] Homaio, “Carbon trading volume in the eu ets 2022,” <https://www.homaio.com>, 2022.
- [30] E. Marketplace, “State of the voluntary carbon markets 2021,” <https://www.ecosystemmarketplace.com>, 2021.
- [31] —, “State of the voluntary carbon markets 2023,” <https://www.ecosystemmarketplace.com>, 2023.
- [32] B. N. E. F. (BNEF), “Bloombergnef expects global carbon market hits \$800 billion in 2023,” <https://www.recessary.com/en/news/world-finance/bloombergnef-expects-global-carbon-market-hits-800-billion-2023>, 2023, accessed: 2024-04-14.
- [33] M. . Company, “A blueprint for scaling voluntary carbon markets to meet climate goals,” <https://www.mckinsey.com>, 2021.
- [34] C. Focus, “Voluntary carbon market overview,” <https://www.climatefocus.com>, 2022.
- [35] Arbonics, “State of standards in voluntary carbon markets,” <https://www.arbonics.com>, 2021.
- [36] ICVCM, “Core carbon principles and assessment framework,” <https://www.icvcm.org>, 2023.
- [37] C. for Strategic and I. Studies, “The role of standards in carbon markets,” <https://www.csis.org>, 2023.
- [38] S. Pole, “Corsia and the voluntary carbon market,” <https://www.southpole.com>, 2023.
- [39] European Environment Agency, “Emissions trading viewer - dashboards,” 2024, accessed: April 2025. [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/maps-and-charts/emissions-trading-viewer-1-dashboards>
- [40] Eurostat, “Energy database - eurostat,” 2024, accessed: April 2025. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/database>
- [41] S. E. D. Board, “Singapore-backed platform cad trust boosts transparency, covers 85 % of carbon credit market,” 2023, accedido en abril de 2025. [Online]. Available: <https://www.edb.gov.sg/en/business-insights/insights/singapore-backed-platform-cad-trust-boosts-transparency-covers-85-of-carbon-credit-market.html>
- [42] T. C. Warehouse, “Climate action data trust (cadt),” 2023, accedido en abril de 2025. [Online]. Available: <https://www.theclimatewarehouse.org/work/climate-action-data-trust>

- [43] L. Jennifer, “Top 5 carbon crypto companies to watch in 2024,” <https://carboncredits.com/the-top-5-carbon-crypto-companies-to-watch-in-2023/>, Jan. 2023, accessed: 2025-4-15.
- [44] W. E. Forum, “How carbon-backed cryptocurrencies are tackling climate change,” 2022, accedido en abril de 2025. [Online]. Available: <https://www.weforum.org/stories/2022/07/carbon-backed-cryptocurrency-tackling-climate-change/>
- [45] W. Bank, “What you need to know about the measurement, reporting and verification (mrv) of carbon credits,” 2022, accedido en abril de 2025. [Online]. Available: <https://www.worldbank.org/en/news/feature/2022/07/27/what-you-need-to-know-about-the-measurement-reporting-and-verification-mrv-of-carbon-credits>
- [46] InterWork Alliance, “Infographics: Carbon markets, mrv and dmrv,” https://assets.ctfassets.net/so75yocayyva/6FMBVIQ8Vtf5YDowpybiyK/3ca9e0136725ff355a18c4d70588e6ad/IWA_Infographics_Carbon_Markets__MRV____dMRV.pdf, 2023, accedido el 16 de abril de 2025.
- [47] i. Gold Standard, South Pole, “Digital mrv presentation – gold standard cop24,” <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Digital%20MRV%20Presentation%20Gold%20Standard%202018%2012%20COP.pdf>, 2018, accedido el 16 de abril de 2025.
- [48] World Bank, “Infrastructure to meet reporting requirements under article 6,” <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/36246>, 2022, carbon Markets and Innovation Team. [Online]. Available: <https://openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/19af4f43-96ff-55cd-bc79-72c767833dd4/content>

Anexos

Código Python: Análisis Econométrico y PCA del mercado EU ETS

A continuación se presenta el código Python utilizado para la limpieza de datos, análisis exploratorio, PCA y regresión OLS.

```
1
2 # 1. Librerías necesarias
3 import pandas as pd
4 import seaborn as sns
5 import matplotlib.pyplot as plt
6 from sklearn.decomposition import PCA
7 from sklearn.preprocessing import StandardScaler
8 import statsmodels.api as sm
9 from statsmodels.stats.outliers_influence import variance_inflation_factor
10
11 # 2. Cargar el dataset actualizado
12 df = pd.read_excel(r"C:\Users\dibecla\OneDrive\Universidad_Pontificia_Comillas\TFG_
13     Relaciones_Internacionales\Dataset_EU_ETS.xlsx", header=0)
14
15 # 3. Matriz de correlación
16 corr = df_relativo.drop(columns=['Year']).corr()
17 plt.figure(figsize=(10,8))
18 sns.heatmap(corr, annot=True, cmap="coolwarm", fmt=".2f")
19 plt.title('Matriz_de_Correlacion_Variabes_Relativas')
20 plt.show()
21
22 # 4. Pairplot (graficos de dispersion)
23 sns.pairplot(df_relativo.drop(columns=['Year']))
24 plt.suptitle('Graficos_de_Dispersion_entre_Variabes', y=1.02)
25 plt.show()
26
27 # 5. VIF para multicolinealidad
28 X = df_relativo[['Carbon_Price', 'Energy_Intensity', 'Employment', 'Capital_GDP']]
29 X = sm.add_constant(X)
30 vif = pd.DataFrame()
31 vif["Variable"] = X.columns
32 vif["VIF"] = [variance_inflation_factor(X.values, i) for i in range(X.shape[1])]
33 print(vif)
34
35 # 6. Modelos de regresion OLS progresivos
36 X1 = sm.add_constant(df_relativo['Carbon_Price'])
37 y = df_relativo['Emissions_GDP']
38 modelo1 = sm.OLS(y, X1).fit()
39 print('Modelo_1:')
40 print(modelo1.summary())
41
42 X2 = sm.add_constant(df_relativo[['Carbon_Price', 'Energy_Intensity']])
43 modelo2 = sm.OLS(y, X2).fit()
44 print('Modelo_2:')
45 print(modelo2.summary())
```

```

46 X3 = sm.add_constant(df_relativo[['Carbon_Price', 'Energy_Intensity', 'Employment', '
    Capital_GDP']])
47 modelo3 = sm.OLS(y, X3).fit()
48 print('Modelo_3:')
49 print(modelo3.summary())
50
51 # =====
52 # APLICACION DEL ANALISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (PCA)
53 # =====
54
55 # 7. Estandarizar las variables predictoras
56 features = ['Carbon_Price', 'Energy_Intensity', 'Employment', 'Capital_GDP']
57 X = df_relativo[features]
58 scaler = StandardScaler()
59 X_scaled = scaler.fit_transform(X)
60
61 # 8. Aplicar PCA
62 pca = PCA()
63 X_pca = pca.fit_transform(X_scaled)
64
65 # 9. Scree Plot
66 plt.figure(figsize=(8,5))
67 plt.plot(range(1, len(pca.explained_variance_ratio_)+1), pca.explained_variance_ratio_
    .cumsum(), marker='o')
68 plt.title('Varianza_Acumulada_Explicada_por_PCA')
69 plt.xlabel('Numero_de_Componentes_Principales')
70 plt.ylabel('Varianza_Acumulada')
71 plt.grid(True)
72 plt.show()
73
74 # 10. Crear DataFrame con componentes principales
75 df_pca = pd.DataFrame(X_pca, columns=[f'PCA{i+1}' for i in range(X_pca.shape[1])])
76 df_pca['Emissions_GDP'] = df_relativo['Emissions_GDP'].values
77
78 # 11. Modelo de regresion OLS con PCA
79 X_reg_pca = sm.add_constant(df_pca[['PCA1', 'PCA2']])
80 modelo_pca = sm.OLS(df_pca['Emissions_GDP'], X_reg_pca).fit()
81 print('Modelo_final_tras_aplicar_PCA:')
82 print(modelo_pca.summary())
83
84 # 12. Biplot del PCA
85 def biplot(pca, scaled_data, features):
86     pcs = pca.transform(scaled_data)
87     plt.figure(figsize=(10,8))
88     plt.scatter(pcs[:, 0], pcs[:, 1], c='blue', edgecolor='k')
89     for i, feature in enumerate(features):
90         plt.arrow(0, 0, pca.components_[0, i]*3, pca.components_[1, i]*3,
91             color='red', alpha=0.7, head_width=0.05)
92         plt.text(pca.components_[0, i]*3.2, pca.components_[1, i]*3.2, feature,
93             color='red', ha='center', va='center')
94     plt.xlabel('Componente_Principal_1')
95     plt.ylabel('Componente_Principal_2')
96     plt.title('Biplot_del_PCA')
97     plt.grid(True)

```

```

98     plt.show()
99
100 biplot(pca, X_scaled, features)
101
102 # 13. Matriz de Loadings
103 loadings = pd.DataFrame(pca.components_.T, columns=[f'PC{i+1}' for i in range(pca.
104     n_components_)], index=features)
105 print("Matriz de Loadings (Pesos de las variables en las componentes principales):\n")
106 print(loadings)
107
108 # 14. Grafico de Loadings
109 loadings.plot(kind='bar', figsize=(12,6))
110 plt.title('Cargas de las Variables en los Componentes Principales')
111 plt.ylabel('Peso')
112 plt.grid(True)
113 plt.show()

```

Listing 1: Analisis Exploratorio, Regresiones Lineales y PCA aplicado al EU ETS

Declaración de Uso de Herramientas de IA Generativa

en Trabajos Fin de Grado

Por la presente, yo, **Marta Vara**, estudiante de **E6 Analytics** de la **Universidad Pontificia Comillas**, al presentar mi Trabajo Fin de Grado titulado:

“Análisis de los Mercados de Carbono y su Evolución: El Caso del Sistema de Comercio de Emisiones de la Unión Europea (EU ETS)”

declaro que he utilizado la herramienta de IA Generativa **ChatGPT** u otras similares de IAG únicamente en el contexto de las actividades descritas a continuación:

1. **Sintetizador y divulgador de libros complicados:** Para resumir y comprender literatura compleja.
2. **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 qué 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: 02/05/2025

Firma: **Marta Vara**