



Facultad de Ciencias Humanas y Sociales
Grado en Relaciones Internacionales

Trabajo Fin de Grado

Análisis de la efectividad del funcionamiento de los
Mercados de Emisiones para el desarrollo sostenible,
a través de la comparativa entre Alemania y Corea del Sur.

Autor: Berenguela García-Baquero Rueda

Director: Juan Felipe Jung Lusiardo

MADRID | Abril 2024

RESUMEN

Este trabajo de fin de grado se enfoca en la efectividad del funcionamiento de los Mercados de Emisiones para el desarrollo sostenible y lo hace comparando Alemania y Corea del Sur. Iniciado por una motivación resultante de haber entrado en contacto con el desarrollo de un proyecto de reforestación y tras el análisis de las exigencias de la responsabilidad corporativa a día de hoy, se plantean preguntas sobre el impacto real de los mercados de carbono en la reducción de emisiones y su credibilidad. La selección de Alemania y Corea del Sur como casos de estudio se justifica por sus diferentes trayectorias en la implementación de mercados de carbono, proporcionando una base para análisis comparativos sobre su efectividad.

El texto aborda la historia y teoría detrás de los mercados de carbono, distinguiendo entre los voluntarios y regulados, y cómo estos interactúan con los esfuerzos globales de descarbonización. Además, se utilizan análisis descriptivos y regresiones lineales para evaluar el impacto ambiental de las políticas implementadas en ambos países, apoyándose en una variedad de datos y estadísticas sectoriales sobre emisiones. Finalmente, se discuten los retos y oportunidades futuras del mercado voluntario de carbono, destacando la importancia de la integridad, transparencia, y cooperación internacional para superar los obstáculos de estos mercados y maximizar su contribución al desarrollo sostenible y a la lucha contra el cambio climático.

PALABRAS CLAVE

Mercado voluntario de Carbono, Mercado de emisiones regulado, créditos de Carbono, Corea del Sur, Alemania, desarrollo sostenible, política ambiental.

ABSTRACT

This dissertation focuses on the effectiveness of the functioning of Emissions Markets for sustainable development and does so by comparing Germany and South Korea. Initiated by a motivation resulting from contact with the development of a reforestation project and following the analysis of the demands of corporate responsibility today, questions are raised about the actual impact of carbon markets on emission reductions and their credibility. The selection of Germany and South Korea as case studies is justified by their different track records in implementing carbon markets, providing a basis for comparative analyses of their effectiveness.

The text discusses the history and theory behind carbon markets, distinguishing between voluntary and regulated markets, and how these interact with global decarbonisation efforts. In addition, descriptive analyses and linear regressions are used to assess the environmental impact of the policies implemented in both countries, drawing on a variety of sectoral emissions data and statistics. Finally, future challenges and opportunities for the voluntary carbon market are discussed, highlighting the importance of integrity, transparency, and international cooperation to overcome the obstacles of these markets and maximise their contribution to sustainable development and the fight against climate change.

KEYWORDS

Voluntary Carbon Market, Regulated Emissions Market, Carbon credits, South Korea, Germany, sustainable development, environmental policy.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	6
MOTIVACIÓN DE LA IDEA	6
PAÍSES Y JUSTIFICACION DE LA SELECCIÓN.....	7
REVISIÓN DE LA LITERATURA	12
TEMAS	13
<i>RELEVANCIA DEL DESARROLLO SOSTENIBLE</i>	13
Por qué hablamos de 1,5 °C. ¿Cuán cerca estamos de 1,5 °C?.....	13
Impactos de un calentamiento global de 1,5 °C en los sistemas naturales y humano.	15
Trayectorias de mitigación compatibles con 1,5 °C en el contexto del desarrollo sostenible	17
Fortalecimiento y aplicación de la respuesta mundial para el desarrollo sostenible	18
<i>DETERMINANTES DE EMISIONES DE CO2</i>	19
Emisiones de CO2 por sectores de Corea del Sur y Alemania	21
<i>MERCADO DE EMISIONES: ORIGEN, TEORÍA Y EFECTOS ESPERADOS</i>	23
Introducción al funcionamiento del Mercado Voluntario de Carbono.....	23
Origen del Mercado Voluntario de Carbono. Distinción entre Mercados Voluntarios y Regulados.	24
Funcionamiento del Mercado Voluntario de Carbono.....	25
Mercado Voluntario de Carbono Hoy.....	29
Futuro del Mercado voluntario de Carbono: Retos y Desafíos.	30
MARCO TEÓRICO, OBJETIVOS E HIPÓTESIS Y METODOLOGÍA	32
ANÁLISIS DESCRIPTIVO / EXPLORATORIO	34
ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL (REGRESIÓN)	39
ECUACION DE LA REGRESIÓN LINEAL.....	39
ESTADÍSTICOS VARIABLES.....	41
REGRESIÓN LINEAL	42
RECOMENDACIONES PARA QUE EL MVC SEA EFECTIVO EN LA DESCARBONIZACION	44
CONCLUSION	46
BIBLIOGRAFÍA	46
ANEXO 1. LISTADO DE ABREVIATURAS	51
ANEXO 2. RESULTADOS STATA / GRETEL	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Cambio anual medio global de la temperatura superficial del aire. (Lenssen et al., 2019).

Figura 2: Emisiones mundiales de gases de efecto invernadero por sectores. (Hannah Ritchie, Pablo Rosado and Max Roser, 2020).

Figura 3: emisiones de gases de efecto invernadero por sectores, en Corea del Sur (Our World in Data, 2024.)

Figura 4: emisiones de gases de efecto invernadero por sectores, en Alemania. (Our World in Data, 2024.)

Figura 5: Crecimiento de la Demanda en los Mercados Voluntarios de Carbono desde el año 2010 hasta el 2021. (Carbon Credits, 2021)

Figura 6: comparativa de la evolución de las emisiones de CO2 en toneladas métricas per cápita entre 1990-2020 en Alemania y Corea del Sur. Datos obtenidos de Banco Mundial 2024.

Figura 7: comparativa de la evolución del uso de energía (en kg equivalentes de petróleo per capita), entre 1990 y 2014 entre Alemania y Corea del Sur. Datos obtenidos del Banco Mundial 2024.)

Figura 8: comparativa de la evolución del consumo de energía renovable (% del consumo total de energía final), entre 1990-2019 entre Alemania y Corea del Sur. Datos obtenidos de Banco Mundial 2024.

Figura 9: comparativa de la evolución del consumo de energía procedente de combustibles fósiles (% del total), entre 1990-2014 entre Alemania y Corea del Sur. Datos obtenidos de Banco Mundial 2024.

Figura 10: comparativa del gasto en investigación y desarrollo (% del PIB): entre 1996-2014 en Alemania y Corea del Sur. Datos obtenidos de Banco Mundial 2024.

Figura 11: comparativa de la evolución del PIB per capita (current US\$), entre 1990-2022 entre Alemania y Corea del Sur. Datos obtenidos de Banco Mundial 2024.

Figura 12: Tabla de variables estadísticas: Elaboración Propia a raíz de los datos derivados de la regresión. Procedentes a su vez del Banco Mundial.

Figura 13: Tabla de regresión lineal. Elaboración propia a raíz de los resultados de Stata, con datos derivados del Banco Mundial.

1. INTRODUCCIÓN

A. MOTIVACIÓN DE LA IDEA

Los antecedentes a la motivación de la elección del tema de investigación en “la efectividad de los mercados de emisiones” nace cuando durante unas prácticas curriculares, entré en contacto con un proyecto que componía un vehículo de inversión pionero en la Unión Europea para desarrollar un proyecto de reforestación, a gran escala, tanto en Portugal como en España. Dicho fondo, se había puesto en marcha ya en 2022, y estableció el objetivo de restaurar la biodiversidad con la reforestación de hasta 25.000 hectáreas, acompañado del propósito de capturar aproximadamente, hasta seis millones de toneladas de dióxido de carbono. Este proyecto, fue reciente y satisfactoriamente presentado en la Conferencia de Mercados de Carbono 2023 coordinada por S&P Global Commodity Insights.

En España, para evaluar el desempeño de una empresa en términos de sostenibilidad y responsabilidad social, según la Ley de Información No Financiera y Diversidad, aquellas que se ajusten a unas características (como por ejemplo, empresas que sean de interés público y que cuenten con más de quinientos empleados), deberán producir una memoria de Responsabilidad Social Corporativa también conocida como Informe de sostenibilidad, en el que incluirán información detallada sobre aspectos ambientales, sociales y de gobernanza (ESG). (Garrigues, 2023). Por lo tanto, muchas empresas a raíz del cálculo de su huella de carbono en las Memorias de RSC, toman la decisión de combatir esas emisiones de GEI. Una de las opciones, se da mediante la compra de derechos de CO₂ en el Mercado No Regulado, podríamos decir en este caso particular que se haría mediante la compra de plantaciones de bosques.

El objetivo de la elaboración de este trabajo de fin de grado es entender cómo se produce la venta de un proyecto de dicha magnitud a clientes corporativos que buscan ganar derechos de carbono en mercado voluntario de carbono. Me gustaría aclarar si esta decisión de compensar las emisiones de las empresas se traduce verdaderamente en una acción con repercusión positiva en el medio ambiente, siendo las emisiones de CO₂ reducidas.

Teniendo en cuenta estos antecedentes, sumo a mis inquietudes el que los mercados de emisiones son de gran actualidad y todavía guardan muchas cuestiones a resolver y un futuro de indudable crecimiento. Por tanto, ¿hay valor en poner un precio al carbono para lograr objetivos climáticos? Los datos dicen que actualmente, aproximadamente el 20% de las emisiones globales están reguladas por los mercados de carbono de cumplimiento obligatorio, lo cual muestra un incremento significativo desde el 5% que se registraba hace diez años. Sin embargo, existen impedimentos, como que muchos de los principales contaminadores a nivel mundial aún no participan en estos mercados activamente. Sin embargo, la ambición de empujar el papel de estos mercados hacia un futuro más verde persiste. Por ello, un interrogante a resolver es qué está obstaculizando el exceso de oferta existente y cuál es el origen de las dudas sobre la credibilidad del mercado. (BloombergNEF, 2022).

Muchos de estos interrogantes ya están siendo tratados y discutidos durante la Conferencia Mundial sobre Mercados de Carbono que se celebra anualmente y cuya primera edición se dio tan solo dos años atrás. En ella expertos y líderes de la industria razonan y discuten, bajo el paraguas de la COP 28. Hablan sobre la expansión de programas nacionales de carbono, sobre la importancia de las tecnologías de mitigación de emisiones para alcanzar las emisiones netas, y sobre las mejores prácticas para extender aquellas soluciones basadas en la naturaleza. También se evalúa la transparencia en el mercado voluntario de carbono y se exploran las infraestructuras necesarias para su expansión, resaltando la necesidad de colaboración internacional y de innovación tecnológica en estos esfuerzos. (Global Carbon Markets Conference From S&P Global Commodity Insights, s. f.). En resumen, los mercados de carbono están amparados en esta Conferencia que, anualmente, establece la guía para el crecimiento de los MVC y lucha por las expectativas favorables del mercado.

B. PAÍSES Y JUSTIFICACION DE LA SELECCIÓN

Para analizar el funcionamiento de los mercados de emisiones para el desarrollo sostenible, este TFG ha decidido estudiar las emisiones per cápita de dos países en concreto. Ya que, si analizamos el nivel de emisiones de ambas economías, antes y después de la implantación del Mercado Voluntario de Créditos de Carbono, podremos llegar a unos resultados que, en parte, nos podrán ayudar a comprender más sobre la

efectividad del MVC, y reconocer si éste verdaderamente ayuda a combatir la crisis climática mediante los proyectos que participan que compensan las emisiones. Para llegar a estas conclusiones, compararemos mediante una serie temporal el antes y el después de los dos países seleccionados, desde el momento en el que éstos se introdujeron en los mercados de derechos de emisión.

Los países elegidos son en primer lugar, Alemania, pues ingresó en el MVC a principios de la década de 2000, cuando éste comenzó a ganar impulso. Alemania, junto con Reino Unido, Suecia, Países bajos o Noruega fue de las primeras economías en formar parte del MVC. Asimismo, porque este país tiene una de las mayores economías de Europa, pero a la vez comprende uno los mayores ejemplos de sostenibilidad. Además, nos basamos en estudios previos, que afirman que en los últimos cuatro años, el desarrollo del MVC de compensación de GEI en Alemania ha experimentado un fuerte crecimiento. Desde que se creó el MVC en 1990, en Alemania se han transferido más de 1.200 millones de toneladas de CO₂e. (Para que nos hagamos una idea, esta cifra corresponde a las emisiones medias anuales de Japón.) (Datos macro, 2023)

Por ello, si comparamos esta economía con amplia experiencia en los mercados de emisiones, ya que participa en ellos desde 2005, con una de similar envergadura en crecimiento económico y de similar nivel de emisiones. La respuesta es comparar a Alemania con Corea del Sur, la cual empezó a formar parte del mercado regulado de emisiones hace solo nueve años, en 2015, y tan solo el año pasado se introdujo en los mercados voluntarios de reducción de emisiones. Por lo tanto, sus similitudes en términos de crecimiento económico y emisiones, acompañados de sus diferencias en el plano de los mercados de emisiones durante los últimos treinta años, nos permitirán llegar a conclusiones relevantes.

Centrándonos ahora en Corea del Sur, este país ha hecho esfuerzos por reducir sus emisiones, pero no ha sido hasta el 2023 cuando ha logrado poner en marcha su mercado voluntario de emisiones. Corea del sur, habiendo ratificado el tratado de París en 2016, también busca activamente la transición energética para reducir su dependencia de combustibles fósiles. Esta economía se convirtió en 2022, en el octavo país con mayor nivel de contaminación del planeta. Por ello, el Gobierno de Corea del Sur, se ha comprometido para el año 2030, a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 40 por ciento frente a los niveles registrados en 2018. Además, mediante la implementación de una nueva política energética y de numerosos planes para reducir los

gases de efecto invernadero, esperan alcanzar la neutralidad de carbono en el año 2050. A diferencia de Alemania, Corea del Sur únicamente ha participado hasta la fecha en un único mecanismo de emisiones: el sistema de Comercio de Emisiones de Corea del Sur (KETS), el cual se estableció en 2015 y fue diseñado para ayudar al país a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero. Y no fue hasta el año 2023 cuando la Cámara de Comercio e Industria Surcoreana (KCCI) puso en marcha la bolsa de carbono descentralizada. Como resultado, solo recientemente, las empresas, particulares y otros inversores podrán por primera vez, comprar y vender créditos de carbono en el MVC. (Valdés, 2022).

En Corea del Sur el pasado agosto de 2023, se firmó entre el Centro de Cambio Climático y el Global Carbon Council ¹, un Memorando de Entendimiento, aprobado por la Asociación Internacional de Compensación y Reducción de Carbono (ICROA). Este acuerdo se ratifica con el objetivo de colaborar más estrechamente entre territorios de Oriente Medio, África del Norte y la propia Corea del Sur en términos de reducción de emisiones y para expandir el MVC entre las partes interesadas. Todo ello bajo el Artículo 6.2 del Acuerdo de París, el cual, define las normas para la cooperación voluntaria internacional en referencia a la consecución de los objetivos de reducción de emisiones. Es importante también tener en cuenta a lo largo de este TFG, el artículo 6.2, porque supone en primer lugar, un marco contable para la transferencia de créditos de carbono y, en segundo lugar, un Órgano de Supervisión, desarrollado como mecanismo centralizado para aprobar los proyectos y programas de reducción de emisiones. (Global Carbon Council, 2023 & Carbon Neutral+, 2022)

Volviendo al Memorando de Entendimiento, este da lugar a la estructura necesaria para el correcto funcionamiento de la plataforma de MVC lanzada el 2022 en Corea del Sur. La cual facilitará el intercambio de conocimientos, el desarrollo de competencias y programas de capacitación para las partes interesadas, incluidas organizaciones gubernamentales y del sector privado en Corea del Sur. Es cierto, que en Corea del Sur existía ya un Mercado de Carbono de Cumplimiento (MCC), pero muy limitado, ya que solo pueden participar empresas autorizadas por el gobierno. Por ello, a través del Memorando de Entendimiento se inicia en la región la expansión del Mercado Voluntario de Carbono, que hoy funciona con independencia de intervención gubernamental en

¹ El Centro de Cambio Climático, es una organización sin fin de lucro surcoreana, dedicada al clima. Y el Global Carbon Council, es el único programa internacional de acreditación de GEI en el Sur Global.

Corea del Sur, para agilizar y mejorar la escala y la eficiencia del comercio de créditos de carbono. A largo plazo, se busca la mejora de uniformidad y eficiencia en los procesos para medir las reducciones de emisiones, garantizando así la integridad de su MVC. (Global Carbon Council, 2023 & Yeon-woo, 2023)

Existen aspectos positivos y negativos del nuevo MVC en Corea del Sur. Por un lado, es positivo ya que las empresas en bolsa lo ven como una futura fuente de oportunidad de crecimiento, para adoptar prácticas más sostenibles y beneficiarse de una mejor reputación. También es beneficioso para la mejora de sus principios ambientales, sociales y de gobierno corporativo (ESG) o para abrir puertas a financiamiento sostenible y alcanzar los objetivos de reducción de emisiones establecidos a nivel nacional. Igualmente, como enfatizó Kim Kyung-sik, presidente de la ESG Network Surcoreana, es necesario que existiera una confianza pública para que la Cámara de Comercio e Industria de Corea, (que representa los intereses empresariales) dinamice el MVC en Corea del Sur y logre su reconocimiento global y evitar el lavado verde corporativo. (Yeon-woo, 2023).

Volviendo al caso de Alemania, desde principios de siglo, ha sido un actor clave en la promoción del desarrollo en los mercados mundiales de carbono. Es más, esta economía ha fomentado activamente la cooperación internacional para apoyar la conceptualización, aplicación y capacitación de los mecanismos de mercado en países emergentes y en desarrollo. Alemania ha logrado crear mayores vínculos internacionales entre mercados globales e implementar instrumentos como los enfoques de comercio y acreditación. Por ello, desde el ámbito de la política y la cooperación internacional, Alemania busca continuar siendo un actor clave y proactivo. Esto ha quedado reflejado en los Acuerdos de Coalición de varios gobiernos federales recientes como, por ejemplo, el Acuerdo de Coalición del período parlamentario 2009-2013; o el acuerdo de Coalición para el período parlamentario 2013-2017 ²). (Warnecke et al. 2017 & Kind et al. 2010).

Esta consolidación política con el desarrollo del mercado de carbono también se refleja en el presupuesto federal, en particular en los planes presupuestarios del Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza, Construcción y Seguridad

² El Acuerdo de Coalición para el período parlamentario 2009-2013, destaca el comercio de emisiones como uno de los instrumentos principales de protección climática que podría desarrollarse dentro de un mercado global de carbono. Y el acuerdo de Coalición parlamentario 2013-2017, que destaca por la importancia del efectivo comercio de emisiones a nivel europeo.

Nuclear (BMUB) y el Ministerio Federal de Desarrollo y Cooperación (BMZ) alemanes. Por ello, podríamos decir que tradicionalmente la acción de cooperación internacional de Alemania se ha centrado tanto en el lado de la oferta como en el de la demanda. Desde la oferta, destaca la reforma del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), el cual es ahora un componente clave en la mitigación del cambio climático a nivel de cooperación internacional. Con este mecanismo, Alemania ha fomentado el desarrollo de tecnologías limpias en países en desarrollo, facilitando así más proyectos generadores de créditos de carbono. (Rashmi & Ahuja, 2019).

Y desde el lado de la demanda, mediante principalmente políticas y participaciones empresariales de compra de créditos de carbono para compensar emisiones de gases de efecto invernadero. Tomemos como ejemplo compañías como Lufthansa, la cual, en 2023 llevó a cabo la compra anticipada de créditos de reducción de emisiones de CO₂ procedentes de la tecnología DACCS (Direct Air Carbon Capture and Storage). (Aeroespacial, 2023). O BASF, empresa alemana que se ha marcado el objetivo de, en comparación con los niveles de 2018, reducir un 25% sus emisiones para 2030 y alcanzar cero emisiones netas de CO₂ para 2050. Para ello, usa medidas de compensación externas, como la compra de certificados en el EU ETS, para gestionar las emisiones que actualmente no puede reducir. (BASF, 2024). En conclusión, el compromiso de Alemania con el MVC es a largo plazo y esta economía se ha caracterizado por ser siempre una de las principales impulsoras y defensoras del modelo. Sumado a que Alemania siempre ha continuado en su colaboración con el resto de los países en la reforma y desarrollo adicional de las actividades del mercado de carbono a nivel mundial. (Warnecke et al. 2017)

Por tanto, Corea del Sur y Alemania son dos estados con los que se puede estudiar el funcionamiento de los mercados de emisiones. Son ejemplo porque los dos tienen políticas ambientales sólidas y un compromiso con la reducción de emisiones y porque ambos necesitan gestionar altos niveles de emisiones industriales: Alemania por su manufactura y automoción, y Corea del Sur por su tecnología y electrónica. En resumen, tienen una base común que permite analizar los datos de sus emisiones y las tendencias de reducción, para averiguar qué factores contribuyen a un sistema de comercio exitoso.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

Es necesario mencionar, que sí hay estudios que ya han evaluado empíricamente el impacto de los mercados en la reducción de emisiones. Uno de los ejemplos más relevantes es, en primer lugar, el estudio sobre el Esquema de Comercio de Emisiones de Carbono en China. Este estudio concluye que el mercado regulado (ETS), ha sido efectivo en reducir las emisiones de carbono, especialmente a través de la disminución del consumo de carbón y la optimización de la estructura energética, aunque no tanto por innovación tecnológica o cambios industriales. El autor recomienda expandir y mejorar el diseño del mercado de carbono en China y coordinar políticas regionales para evitar la fuga de carbono y fortalecer los esfuerzos de reducción de emisiones. (Yang et al., 2022).

Y por otro lado, a través del *paper* “Mercados Voluntarios de Carbono: una herramienta eficaz para la descarbonización” Esti De Boever (2023), revela que los mercados voluntarios de carbono tienen un potencial significativo. No solo por la estimación que hace del crecimiento de los mismos, sino también porque además de la reducción y remoción de emisiones, muchos proyectos de mitigación en el MVC, generan valor agregado más allá, como el fomento del desarrollo sostenible y la innovación tecnológica y pueden promover beneficios sociales y ambientales adicionales. Esto sumado a que se espera que el valor de mercado de los VCM alcance entre \$10 y \$75 mil millones para 2030, lo que podría significar un mecanismo importante para canalizar financiamiento climático desde compradores en el Norte Global hacia proyectos en el Sur Global, apoyando así el desarrollo sostenible y equilibrando la distribución global de los recursos para la acción climática.

Sin embargo, ningún estudio ha analizado la efectividad del mercado de emisiones desde la comparativa de dos países en concreto. Por ello, habiendo justificado por qué son candidatos para el análisis del funcionamiento de mercados de emisiones para el desarrollo sostenible, continuamos exponiendo cómo están ligados los mercados de emisiones con el desarrollo sostenible y por qué nacen como herramienta para potenciar el desarrollo medioambiental. Exponemos también los determinantes de emisiones de CO₂ tanto en Alemania como en Corea del Sur, porque a raíz de esta información, podremos elaborar el marco teórico de la investigación, así como la posterior formulación de objetivos y preguntas de investigación. Finalizamos la revisión de la literatura con el

estudio del mercado de emisiones, haciendo hincapié en su funcionamiento y en los efectos esperados para completar la evaluación de la efectividad de los mercados de emisiones.

A. TEMAS

I. RELEVANCIA DEL DESARROLLO SOSTENIBLE

El informe 2022 del IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático), “Cambio climático 2022: impactos, adaptación y vulnerabilidad”, fue decisivo para señalar cómo las negativas consecuencias del cambio climático están teniendo un impacto más rápido en la Tierra de lo que los expertos habían predicho varias décadas atrás. Las olas de calor, las sequías y otros acontecimientos climáticos extremos, dependiendo de su duración y magnitud, pueden rebasar un umbral máximo y convertirse en irreversibles. El desarrollo sostenible es esencial ya que el crecimiento en el volumen de gases de efecto invernadero, tiene sus consecuencias más fuertes y directas en las comunidades, regiones y ecosistemas más vulnerables que carecen de capacidad de adaptación. Por ello, desde hace décadas, las evidencias científicas alertan de que el cambio climático representa una amenaza para la salud del planeta y el bienestar de la humanidad. Dicho esto, con una acción mundial rápida y efectiva de adaptación y mitigación, se espera conseguir un margen de reacción que garantice un futuro habitable para las próximas generaciones. Con esta acción mundial concertada, mediante la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y con una adaptación de las poblaciones a la nueva vida con el cambio climático, el peor desenlace podrá ser evitado. (Naciones Unidas & Tollefson 2023).

- *Por qué hablamos de 1,5 °C. ¿Cuán cerca estamos de 1,5 °C?*

Como sabemos, la combustión de recursos energéticos derivados de las fuentes fósiles y la gestión inadecuada y desigual de la energía y los recursos naturales a lo largo de más de un siglo ha conducido a un aumento total de la temperatura global de 1,3 °C en comparación con los niveles anteriores a la revolución industrial. Por ello, la política

climática internacional en 1992, con la CMNUCC³ expuso la necesidad de estabilizar a un nivel seguro, las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Fue el Protocolo de Kyoto (1997), el primer tratado de carácter mundial adoptado con el objetivo único de la reducción de gases de efecto invernadero. Este, estableció un primer marco con objetivos de reducción específicos para los países que formaban parte (ambos Corea del Sur y Alemania firmaron y ratificaron el Protocolo durante ese año). En él, el Consejo del Medio Ambiente de la Unión Europea concretó que la temperatura global media no podría superar en 2°C a los niveles preindustriales de 1996. Este hito es el inicio en la historia del 1,5 °C. (Naciones Unidas & Tollefson 2023).

Reforzado por evidencias científicas conclusivas, fue con el Acuerdo de Copenhague de 2009, donde se reafirmó el objetivo mundial a largo plazo del límite del aumento de la temperatura a 1,5 °C. Y posteriormente, tras el Acuerdo de Cancún (2010), se emitió el primer documento de la CMNUCC que habló del límite del calentamiento global a 1,5 °C. Este tope, se concretó en la COP21⁴, ya que se estableció el objetivo de limitar el calentamiento mundial a muy por debajo de 2°C, preferiblemente a 1,5°C. (Naciones Unidas, McGrath & Tollefson 2023).

Como vemos en la gráfica inferior, existe una dificultad para que se mantenga el límite del calentamiento global, ya que el crecimiento en el cambio anual medio global de la temperatura a lo largo de lo largo de los siglos XIX, XX y XXI siempre ha sido creciente. Por lo tanto, en 2018 el IPCC puso en evidencia la dificultad para lograr este desafío sin precedentes, a pesar de que gran parte de los países que adoptaron el Acuerdo de París, tienen ahora el objetivo de mantener los esfuerzos para limitar el calentamiento a 1,5 °C. El Administrador de la NASA, Bill Nelson (2022), nos expone un ejemplo que describe claramente la situación, pues afirmó que durante la última década, se han registrado ocho de los diez años más cálidos experimentados por la tierra. Siendo 2016 y 2020 los años más caliente desde que se tienen registros. Es más, los investigadores hoy afirman con un 98% de seguridad, de que en el futuro a corto plazo, es decir entre 2023 y 2027, el límite de 1,5 grados centígrados para la temperatura media anual será sobrepasado por primera vez en la historia de la humanidad. (Naciones Unidas, McGrath & Tollefson 2023).

³ CMNUCC: Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

⁴ COP21: Conferencia sobre el Cambio Climático de París

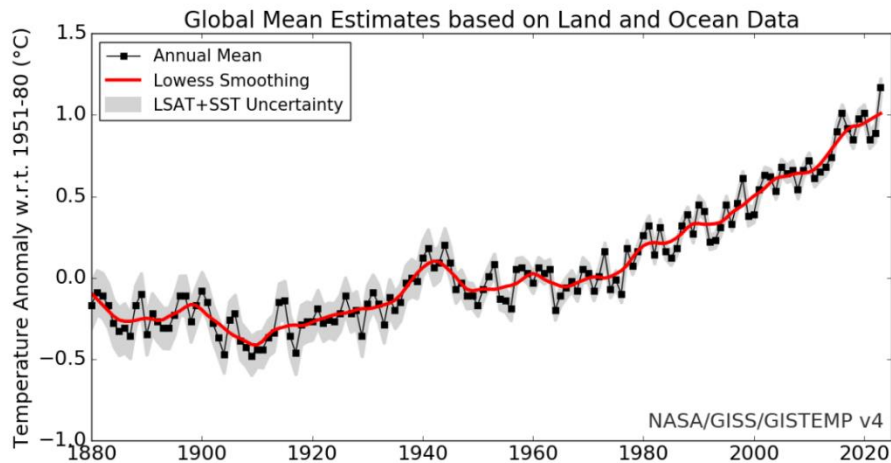


Figura 1: Cambio anual medio global de la temperatura superficial del aire. (Lenssen et al., 2019).

- *Impactos de un calentamiento global de 1,5 °C en los sistemas naturales y humano.*

Como ya hemos expuesto, los impactos del cambio climático afectan de forma global, pero su fuerza es desigual dependiendo de la zona geográfica. Los más afectados son los países en desarrollo y los países insulares de los trópicos y regiones de latitud media. Por ello, considerando que casi la mitad de la población mundial vive en regiones vulnerables al cambio climático, esto se traduce en más de un cuarenta por ciento de la población mundial dependiendo de su capacidad para prepararse ante el cambio climático. Además, se prevé que el cambio climático se multiplicará en la pobreza, ocasionará la pérdida de medios de subsistencia de las comunidades e incluso la pérdida de la cultura. Además, cuando los riesgos vienen de la mano de otros fenómenos adversos, como las pandemias o los conflictos, resultan aún más difícil controlarlos. (IPCC 2019, IPCC 2023 & Tollefson 2022).

Los eventos climáticos extremos y el calentamiento global, según el informe del IPCC 2022, también afectan severamente a la salud mental de aquellos obligados a vivirlos, pues a consecuencia de las catástrofes como incendios y olas de calor, suceden numerosas muertes y se generan problemas cardiovasculares y respiratorios derivados entre otros, por la inhalación de humos. Respecto a las lluvias e inundaciones, éstas dan lugar la propagación de enfermedades como el Cólera, el Dengue o la Malaria. Además, en la última década, el número de víctimas mortales derivado de las inundaciones, sequías y tormentas fue 15 veces más alto en las regiones más vulnerables. Todo ello sumado, a que también está en riesgo la seguridad alimentaria, por las desfavorables condiciones

meteorológicas e incluso la seguridad hídrica asociadas al clima. (IPCC 2019, IPCC 2023 & Tollefson 2022).

Si las temperaturas continúan subiendo llegará un punto en el que será inviable proteger las zonas costeras de las tormentas extremas, que ahora está teniendo lugar gracias a la restauración de arrecifes de coral, manglares y humedales. Asimismo, como consecuencia de la expansión térmica del océano, los territorios afectados por la subida del nivel del mar se verán también directamente perjudicados por la erosión costera, las inundaciones y la pérdida de recursos de agua dulce. Además, si las emisiones de CO₂ continúan, la acidificación del océano crecerá, a consecuencia del exceso de dióxido de carbono que absorbe de la atmósfera. Los arrecifes de coral también se encuentran en peligro ante el aumento de la temperatura. Lo que supone un riesgo ya que albergan un 25% de la vida marina y garantizan la formación de otros ecosistemas. Además, cerca del ocho por ciento de la población mundial es dependiente de ellos en cuanto a protección costera, recursos pesqueros⁵ y turismo. (Coral Guardian 2023, IPCC 2019, IPCC 2023 & Tollefson 2022).

En base al estudio del aumento de 0,5 °C en los últimos 50 años, la comunidad científica nos habla de los cambios habidos y por haber, en los ecosistemas y en la distribución de las especies animales y vegetales. A continuación, vamos a explicar dos procesos críticos. En primer lugar, el Ártico está en riesgo, ya que se han desencadenado los mecanismos de auto amplificación. Se trata de proceso a través del cual, el calentamiento produce el derretimiento de la nieve y el hielo, lo que reduce la reflectividad de la radiación solar en la superficie, o la desecación del suelo, y provoca un menor enfriamiento por evaporación en el interior de los continentes. En segundo lugar, el peligro bajo el que se encuentran las zonas boscosas del permafrost ártico, que actúan como reservas de CO₂. Pues bien, con el aumento de las temperaturas, la actividad microbiana aumenta y esta, acelera la descomposición de la materia orgánica del suelo de los bosques, lo que lleva al deshielo del permafrost. Lo que pone en riesgo el desencadenando de liberación significativa de gases de efecto invernadero a la atmósfera, lo que da lugar a un ciclo de retroalimentación negativa: a mayor calentamiento global, más deshielo y liberación de gases, lo que a su vez causa un mayor calentamiento. (IPCC 2019, IPCC 2023 & Tollefson 2022).

Por ello, para preservar la resistencia de la biodiversidad y los ecosistemas frente al calentamiento global y garantizar la salud del planeta, será crucial conservar como

⁵ (proveen cerca del 10 % de la pesca mundial)

mínimo aproximadamente el 30% al 50% de recursos terrestres, de agua dulce y marinos de las áreas oceánicas de la Tierra. Ya que en última instancia el clima, los ecosistemas y la sociedad están altamente interconectados. (IPCC 2019, IPCC 2023 & Tollefson 2022).

- *Trayectorias de mitigación compatibles con 1,5 °C en el contexto del desarrollo sostenible*

Para limitar el calentamiento global a 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales, la opción óptima sería buscar unas “emisiones negativas netas”, es decir que la cantidad de CO₂ emitida a la atmósfera fuera menos que la cantidad retirada. En otras palabras: que los sumideros de CO₂ sean mayores que las fuentes, objetivo que todavía estamos lejos de alcanzar en la actualidad. Por ello, hablamos también de la neutralidad de carbono, que implica que la cantidad de CO₂ emitido sea igual al retirado. La neutralidad de carbono estabilizaría la temperatura global y la lograría la reducción a cero de las emisiones netas de CO₂. Como resultado, se podría llegar a un nuevo equilibrio donde la concentración de CO₂ en la atmósfera disminuiría lentamente, mediante el proceso de redistribución y absorción de las emisiones de CO₂ por los océanos y la biosfera de la tierra. (IPCC 2019).

Por remoción de dióxido de carbono se entiende el proceso de remover CO₂ de la atmósfera. La remoción de CO₂, se usa para compensar por las emisiones de GEI procedentes de sectores que no pueden descarbonizarse completamente, o de sectores a los que les llevaría mucho tiempo lograrlo. El proceso de remoción tiene dos ramas: en primer lugar y ligado con las emisiones negativas, encontramos la vía que potencia los procesos naturales existentes que remueven carbono de la atmósfera como, por ejemplo, los sumideros de carbono. Y en segundo lugar, la utilización de procesos químicos de captura y almacenamiento de carbono como su mineralización. (IPCC 2019)

Es necesaria una mitigación rápida y de gran escala y por ello, las reducciones en las emisiones de gases de efecto invernadero deben darse en todos los sectores. Hablamos de un planteamiento de carácter “sistémico integral”, donde todas las empresas e industrias apliquen medidas con éxito. Al estar los sectores interconectados, los cambios que se produzcan podrán afectar positiva o negativamente en cualquier otro. Algunos ejemplos de medidas aplicables para rebajar las emisiones son: las energías renovables, porque genera energía con un nivel de emisiones bajas o nulas, el cambio del sistema alimentario mediante la producción y el consumo sostenible. También encontramos la infraestructura verde y la electrificación del transporte o la planificación urbana sostenible. (IPCC 2019).

A la hora de tomar decisiones, también es importante plantear la viabilidad de las medidas de adaptación y mitigación existentes dentro de cada sistema. Es decir, se deberá estudiar la disponibilidad suficientes sistemas y recursos naturales en apoyo de las diversas opciones de transición, la viabilidad tecnológica, la económica, las consecuencias para el comportamiento humano y la salud, y el tipo de apoyo institucional y político que se necesitaría. También encontramos la viabilidad geofísica, que considera factores geológicos, climáticos y geográficos; esencial para asegurarse de que las soluciones de reducción de GEI sean adecuadas para las condiciones locales, sin causar impactos negativos en el entorno geofísico. (IPCC 2019).

- *Fortalecimiento y aplicación de la respuesta mundial para el desarrollo sostenible*

Tomando las palabras de Edwin Castellanos⁶, no solo es importante reducir desde ya las emisiones a corto plazo, sino que hay que incrementar las acciones de adaptación a los impactos ya producidos y aquellos por llegar. De esta forma no comprometemos el futuro habitable para todos. Sumado a ello, tomando las palabras Aditi Mukherji⁷, los países desarrollados deben apoyar mediante recursos financieros a los países en desarrollo para reducir su vulnerabilidad y porque podrán contribuir en la justicia climática; “crucial porque quienes menos han contribuido al cambio climático se ven afectados de forma desproporcionada”. La coordinación de la respuesta mundial yace en el foro intergubernamental de la CMNUCC, concretamente en el ODS 13, que busca implementar políticas de mitigación y adaptación al cambio climático, que reduzcan las emisiones y mitiguen la degradación de los ecosistemas. (IPCC 2019, IPCC 2023 & Tollefson 2022).

Las zonas urbanas son clave para fomentar la acción climática ambiciosa que requiere el desarrollo sostenible. Ejemplos de medidas en el lado de la oferta, en términos generales, serán aquellas que logren reducir las emisiones en los sectores como transporte, agricultura, industria, energía y en otras áreas de la sociedad. Se logra mediante la progresiva reducción del uso del carbón y el aumento de las energías renovables en la industria de la energía. También a través de electrificar el sector del transporte o minimizando el impacto ambiental relacionado con la producción y consumo en el sector alimentario. Por el lado de la demanda, se podrán implementar medidas que mejoren la

⁶ Director del Observatorio de Economía Sostenible de la Universidad del Valle (Guatemala).

⁷ Autora encargada de la redacción del informe IPCC 2023 (uno de los autores).

eficiencia energética de los edificios, los individuos podrán reducir su demanda de productos y servicios intensivos en energía o mediante cambios en el estilo de vida. Todo lo anterior sumado al aumento de la financiación por parte de entidades públicas y privadas en inversiones en la esfera del clima o las medidas de adaptación. Con un compromiso político desde las naciones y acompañado desde la cooperación a escala internacional y de gobernanza inclusiva y tecnologías y conocimientos compartidos. (IPCC 2019, IPCC 2023 & Tollefson 2022).

II. DETERMINANTES DE EMISIONES DE CO₂

En este punto del ensayo, ya tenemos una clara idea de la relevancia del desarrollo sostenible y conocemos los impactos negativos de un calentamiento global de 1,5 °C. En contraposición a este hecho, entendemos también la necesidad de una respuesta mundial para el desarrollo sostenible mediante trayectorias de mitigación, como lo son los mercados de carbono, regulados o no. Por ello antes de analizar la eficacia de los mercados de emisiones en Alemania y Corea del Sur para cumplir con los objetivos marcados de limitar el calentamiento mundial a muy por debajo de 2°C, preferiblemente a 1,5°C, con respecto a los niveles preindustriales, desarrollaremos cuáles son los determinantes de emisiones de CO₂ a nivel global y después concretando para Corea del Sur y Alemania.

A nivel mundial, se emiten anualmente alrededor de 50 mil millones de toneladas de gases de efecto invernadero. A continuación, vamos a desarrollar las emisiones globales por sectores y porcentajes, para determinar cuáles son los más problemáticos. En la Figura dos, se infiere visualmente, cuáles son los sectores más problemáticos. En primer lugar, el uso de energía en la industria supone un 24,2 por ciento en total. Esta cifra engloba las emisiones relacionadas con la energía procedentes de la fabricación del del hierro y del acero (7,2%), de las procedentes de la química y petroquímica (3,6%), del procesamiento de alimentos y fabricación de productos de tabaco (1%) y aquellas emisiones provenientes de la manufactura en minas y canteras, construcción, textiles, productos de madera y equipos de transporte (10,6%) entre otros. (Ritchie, 2020)

El transporte global y todas las emisiones directas procedentes de la quema de combustibles fósiles para impulsar dichas actividades supone un 16,2% en las emisiones

de GEI. Aquellos que más peso tienen en esta cifra son el transporte por carretera, la aviación y el transporte marítimo. Por otro lado, un 17,5% son el total de emisiones relacionadas con la energía generada procedente de los edificios residenciales y los comerciales. Continuamos en orden descendente con un 7,8% de emisiones derivadas de la generación de energía mediante el uso de diferentes fuentes combustibles. Y mencionamos también las emisiones fugitivas, que son aquellas procedentes de la liberación de metano accidental a la atmósfera; estas alcanzan la sorprendente cifra de 3,9%. Llegamos a las emisiones procedentes del uso de maquinaria para los sectores de la agricultura y la pesca, que alcanzan un 1,7%. (Ritchie, 2020)

Concluimos en análisis recalcando que el sector de los procesos industriales directos compone un 5,2% de las emisiones mundiales de GEI y un 3,2% procede de aguas residuales y vertederos. Finalmente, el sector de la agricultura, silvicultura y uso del suelo ocupa un 18,4% emisiones de GEI. Todos estos generadores de GEI, son los que debemos reducir casi a la mitad de aquí a 2030, si se desea limitar el calentamiento a 1,5 °C, mediante la integración de las medidas de adaptación al cambio climático con acciones orientadas a reducir o evitar las emisiones de gases de efecto invernadero, como lo son los Mercados de Emisiones, tanto voluntarios, como regulados. (Ritchie, 2020)

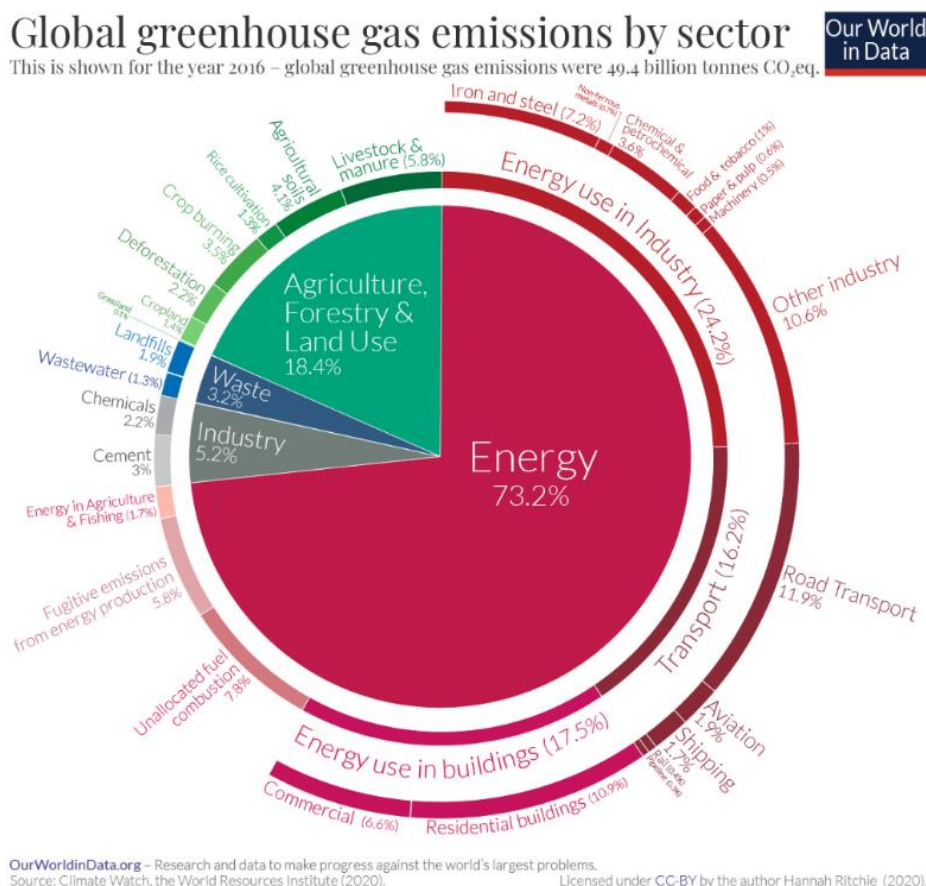


Figura 2: Emisiones mundiales de gases de efecto invernadero por sectores. (Hannah Ritchie, Pablo Rosado and Max Roser, 2020).

- *Emisiones de CO2 por sectores de Corea del Sur y Alemania*

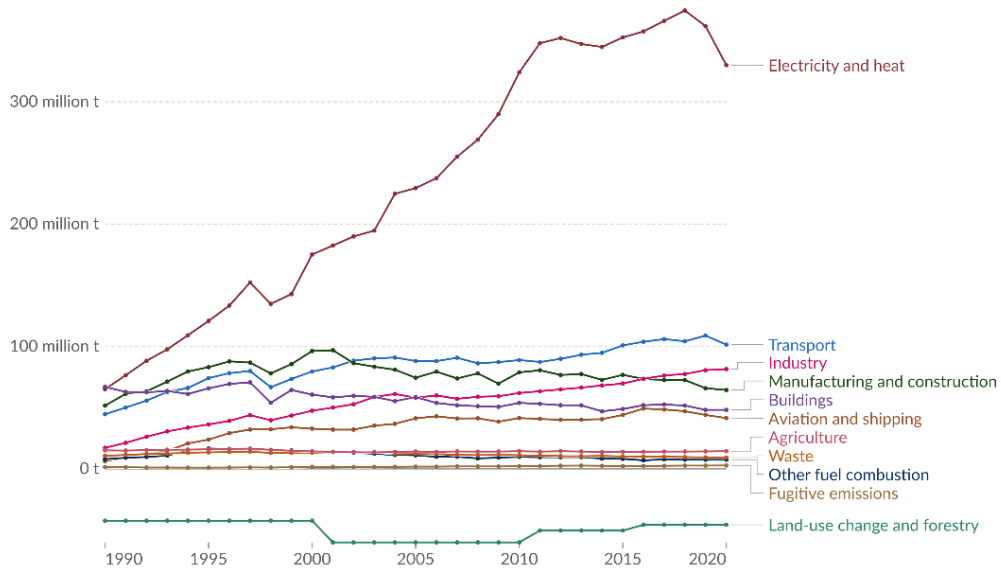
Los gráficos inferiores nos muestran una comparativa de las emisiones de gases de efecto invernadero por sectores entre Corea del Sur y Alemania. Inferimos que, en ambos países el sector de la electricidad y calor es el contribuyente más grande de emisiones. En Alemania, positivamente vemos una tendencia decreciente desde principios de los años 2000, consecuencia de que empiezan tener efectividad las medidas aplicadas y esto se traduce en resultados. Atendiendo al resto de sectores, parece que mientras que en Corea del Sur las emisiones han crecido hasta estabilizarse en los últimos años, Alemania muestra un claro patrón de reducción, especialmente en el sector de electricidad y calor, y Corea del Sur un inicio de tendencia descendiente. Esto es importante porque como sabemos, ambas naciones figuran entre los mayores emisores mundiales, siendo Corea del Sur la séptima y Alemania la sexta, debido principalmente a sus centrales eléctricas alimentadas con combustibles fósiles (Maennel & Kim, 2018).

Como vemos, ambos dependen considerablemente de las plantas de carbón, lo que complica sus objetivos climáticos. Teniendo en cuenta que Corea del Sur aspira a reducir las emisiones un 40% por debajo de los niveles de 2018 para 2030, y ha introducido políticas como un sistema de comercio de emisiones e incentivos para los vehículos eléctricos e híbridos. (Stiftung, s. f.). Y Alemania tiene el objetivo de aumentar la proporción de energías renovables en su combinación energética hasta más del 50 % para 2030. (Maennel & Kim, 2018).

En este contexto, vemos como a partir de la introducción de ambas economías en los mercados de carbono se presentan disminuciones en sus emisiones de GEI, por lo tanto, son una clara solución. Al poner un precio al carbono, se incentiva a las empresas a invertir en tecnologías más limpias y eficientes para reducir sus costes y las opciones basadas en combustibles fósiles se convierten en menos atractivas económicamente, lo que promueve la transición hacia energías limpias. Por lo que los mercados voluntarios de carbono financian el desarrollo de tecnologías innovadoras en captura y almacenamiento de carbono y fomentan la expansión de infraestructuras de energía renovable. Acciones que además ayudan a Corea del Sur y a Alemania en su necesidad de diversificación de su matriz energética. (Maennel & Kim, 2018).

Greenhouse gas emissions by sector, South Korea

Greenhouse gas emissions¹ are measured in tonnes of carbon dioxide-equivalents² over a 100-year timescale.



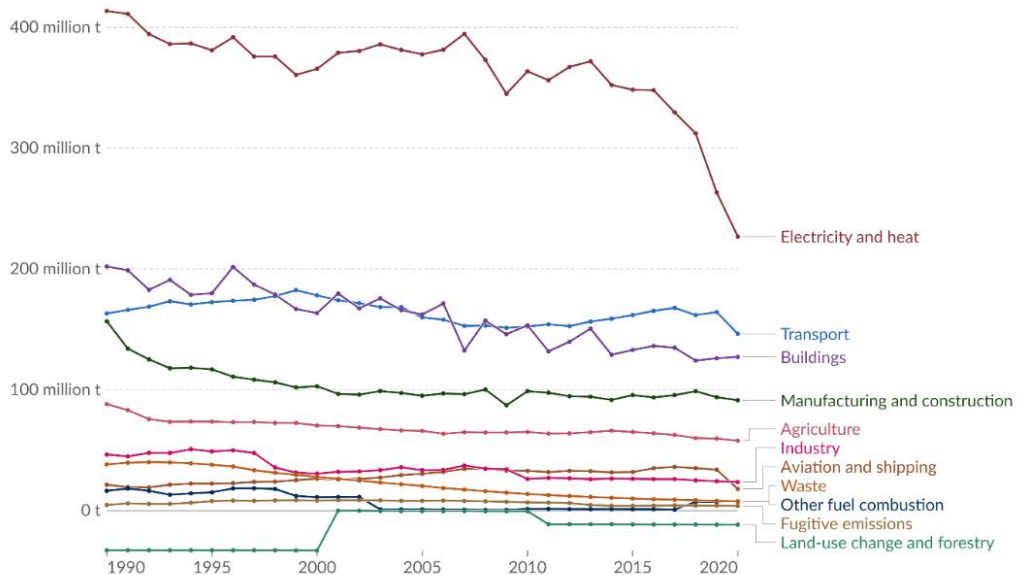
Data source: Climate Watch (2023)

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

Figura 3: emisiones de gases de efecto invernadero por sectores, en Corea del Sur (Our World in Data, 2024.)

Greenhouse gas emissions by sector, Germany

Greenhouse gas emissions¹ are measured in tonnes of carbon dioxide-equivalents² over a 100-year timescale.



Data source: Climate Watch (2023)

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

Figura 4: emisiones de gases de efecto invernadero por sectores, en Alemania. (Our World in Data, 2024.)

III. MERCADO DE EMISIONES: ORIGEN, TEORÍA Y EFECTOS ESPERADOS

- *Introducción al funcionamiento del Mercado Voluntario de Carbono*

En el MVC, individuos, empresas, gobiernos y ONG, es decir partes interesadas tanto públicas como privadas, se relacionan entre ellas para emitir, comprar y vender créditos de carbono. Por ello, en función del agente del que se trate, la participación ocurre por un motivo u otro. Sin embargo, el común denominador del mercado es la emisión de créditos de carbono por parte de actividades que eliminan las emisiones de GEI de la atmósfera, o de actividades que reduzcan las emisiones de GEI con motivo de compensar voluntariamente otras emisiones inevitables. (Dyck et al., 2023). Se trata por tanto de un mecanismo de mercado, totalmente voluntario por naturaleza e impulsado por iniciativas privadas⁸, que ayuda a reducir los GEI en la atmósfera. (Canal S&P Global Commodity Insights, 2023).

Los motivos concretos por los que las empresas participan en el MVC se resumen en la necesidad de conseguir sus objetivos climáticos, en el diferenciarse con respecto a sus competidores, para desencadenar el reconocimiento de marca y la lealtad del consumidor, y como no, para definir y comercializar productos neutros en carbono. (Dyck et al., 2023). Las compañías participan también como consecuencia de los intereses de los inversores, clientes y empleados, los cuales esperan de la empresa la reducción de su huella de carbono. Como respuesta, éstas inician la búsqueda de proyectos de carbono para compensar sus emisiones que son inevitables. (Canal S&P Global Commodity Insights, 2023).

En el MVC, a diferencia de los mercados regulados, los gobiernos no participan creando y verificando créditos de carbono a través regulaciones y agencias gubernamentales (Marbough y Stern, 2021), sino que son un participante más. En el mercado voluntario de carbono el gobierno tiene la oportunidad de tomar parte no solo para aumentar las reducciones de emisiones, sino también para fomentar estratégicamente ciertas actividades del MVC, logrando así dirigir el financiamiento a los sectores donde más se necesita o consiguiendo incentivar la atracción de las inversiones extranjeras directas. El

⁸ Voluntario porque se diferencia de los mercados regulados, donde la legislación del gobierno de cada país, o mediante herramientas reguladoras como los impuestos al carbono, se obliga a los participantes a cumplir con un límite máximo de emisiones de GEI.

resultado, es que el gobierno complementa la acción climática de mitigación adicional del cambio climático. (Dyck et al., 2023).

- *Origen del Mercado Voluntario de Carbono. Distinción entre Mercados Voluntarios y Regulados.*

El origen de los Mercados Voluntarios de Carbono y su idea fundamental de que las compañías privadas pudiesen contrarrestar sus emisiones de GEI mediante la adquisición de créditos de carbono se originó hacia finales de los años ochenta. Posteriormente, en la década de los noventa, se estableció el primer registro privado para las compensaciones voluntarias de carbono en EE. UU., el *Environmental Resources Trust*⁹. Y finalmente, en la década de los dos mil, se consolidaron y ganaron prominencia los estándares privados de carbono que actualmente dominan el MVC. Todo ello teniendo en cuenta que los MVC operan fuera de los requisitos regulatorios y se basan en que organizaciones e individuos elijan voluntariamente compensar sus propias emisiones o respaldar proyectos de reducción de emisiones. (Dyck et al., 2023).

La legislación de los MVC ha experimentado un fuerte desarrollo durante esta última década. Fruto del reconocimiento de la necesidad de garantizar la credibilidad de las compensaciones voluntarias y en ausencia de la supervisión gubernamental, se han llegado a desarrollar más de una docena de normas de compensación voluntaria para este tipo de mercados (Marbough y Stern, 2021). Estas certificaciones fueron desarrolladas porque en un mercado totalmente voluntario, era necesario establecer criterios y protocolos para la medición, verificación y certificación de reducciones de emisiones de GEI generadas por proyectos de compensación de carbono. Hoy, los estándares privados de carbono que dominan el MVC son VCS (*Verified Carbon Standard*), GS (*Gold Standard*), ACR (*American Carbon Registry*) y CAR (*Climate Action Reserve*). A través de ellos, los participantes en el MVC pueden comprar y vender créditos de carbono voluntarios basados en unos estándares concretos y de calidad. (Dyck et al., 2023).

Posteriormente, la compensación de carbono, pero en el contexto de los mecanismos de cumplimiento obligatorio, experimentó un impulso significativo a través de los mecanismos flexibles establecidos por el Protocolo de Kyoto (implementado en el periodo 2008-2012), en forma también de comercio de emisiones. Siendo uno de estos el

⁹ *Environmental Resources Trust*, posteriormente renombrado como *American Carbon Registry (ACR)*.

Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), que marcó un hito al registrar su primer proyecto en 2004. Por ello a partir de este momento, empezamos a hacer una distinción entre los mercados de carbono en términos de regulaciones, impacto, mecanismos de fijación de precios, tamaño del mercado y alcance geográfico entre otros factores. (E. ON SE, 2024).

Estos mercados “de cumplimiento”, obligatorios o también conocidos como mercados regulados, se crean en respuesta a los objetivos de reducción de emisiones establecidos por acuerdos regionales, nacionales e internacionales, legalmente vinculantes¹⁰. Funcionan con sistemas de límites de comercio (*Cap & Trade*) más conocidos como ETS (Sistemas de Comercio de Emisiones). Los sistemas *Cap & Trade*, o de “tope y canje” en español, suelen ser marcos regulatorios establecidos por regímenes nacionales, regionales o internacionales para limitar la cantidad total de emisiones de GEI de los países signatarios. Una estimación del valor actual total de los mercados de cumplimiento a nivel global a 2023, es de un alcance de 230.000 millones de euros. (E. ON SE, 2024). Actualmente, en Europa, el EU ETS, es la herramienta más eficaz para reducir las emisiones de GEI. Se trata de un régimen de comercio de derechos de emisión que nació en 2005 y hoy constituye más del 75% del intercambio global de créditos de carbono, consolidándose como el principal mercado de carbono del mundo. (Climate Trade, 2022).

Adquirir créditos en un MVC no contribuye directamente al cumplimiento de los compromisos del acuerdo de París de un país. No obstante, sí favorece a las empresas al permitirles compensar su huella de carbono individual, impactando así positivamente en sus emisiones netas globales. (E. ON SE, 2024). Como ejemplo, durante los primeros tres trimestres de 2023, los demandantes de créditos de carbono de calidad han adquirido 15.1 millones de toneladas de créditos mediante mercados al contado y acuerdos de compra a futuro. Esto supone un aumento de casi cinco veces en los acuerdos anuales desde 2021. (Potts, 2023).

- *Funcionamiento del Mercado Voluntario de Carbono*

El MVC funciona con la unidad de medida del crédito de carbono, que es el instrumento comercializable que se encuentra en el centro de este ecosistema. Un crédito de carbono

¹⁰ Como el Protocolo de Kioto de 1997 y el Acuerdo de París de 2015.

individual en el MVC supone una tonelada de CO₂e¹¹ no emitida o capturada de la atmósfera. (Dyck et al., 2023). A continuación, vamos a exponer brevemente el funcionamiento de un MVC. El proceso comienza por su puesto por los créditos, que son generados por los desarrolladores o promotores de los proyectos de carbono. Estos son quienes se encargan de identificar la oportunidad de crear el proyecto y de llevar a cabo todo su registro, documentación y certificación. Por otro lado, antes de emitir créditos, estas actividades de reducción o eliminación de GEI, deben estar certificadas por una norma. De esto se encargan las organizaciones independientes, que verifican que en los proyectos de carbono realmente se eliminan o evitan emisiones de carbono y se respetan los principios básicos de la financiación del carbono.¹² (*Canal S&P Global Commodity Insights*, 2023).

A continuación, vamos a explicar cuáles son las variables originadoras del precio cotizado de un crédito de carbono en el MVC. El factor principal que afecta al precio del crédito es la naturaleza del proyecto subyacente. Por ello en general, los proyectos de eliminación de GEI, tienden a negociarse con una prima respecto de los créditos procedentes de evitar la emisión, no sólo por el mayor nivel de inversión requerido; sino también por la alta demanda. Dentro de la categoría de proyectos de “evitación” nos encontramos con: proyectos de energía renovable, proyectos REDD+, que evitan las emisiones en concreto forestales y agrícolas, proyectos de desarrollo de edificios energéticamente eficientes, o proyectos *cookstove*: que son aquellos generados por iniciativas de mejora de la eficiencia de cocinas que usan estufas y combustibles ¹³. (Favasuli & Vandana, 2021). Pero los proyectos más comunes son los de la categoría de eliminación, los cuales, aprovechan la capacidad de los árboles, el océano o el suelo para almacenar carbono, u otros utilizan tecnología para eliminar y almacenar carbono del aire. (*Canal S&P Global Commodity Insights*, 2023).

El precio de los créditos de carbono también se ve afectado por el volumen de créditos negociados en dicho momento (en términos generales, cuánto mayor es el volumen, menor es el precio), la geografía del proyecto (los créditos de los países menos

¹¹ El CO₂e, es una unidad de medida que convierte el potencial de calentamiento global de cualquier GEI en el potencial del GEI de referencia del CO₂.

¹² Principios básicos del financiamiento de carbono; Adicionalidad, no sobreestimación, permanencia, reclamo exclusivo y proporcionar beneficios sociales y ambientales adicionales.

¹³ Como la madera, parafina o queroseno, las cuales que representan aproximadamente el 2% de las emisiones globales de GEI.

adelantados (PMA) tienen unas primas porque, además de los componentes de carbono, cumplen con objetivos de acción social más ambiciosos), su antigüedad (normalmente, cuanto más antiguo sea el proyecto más barato será, pues se trata de una acción climática de menor actualidad), el tiempo requerido para implementar y completar un proyecto de reducción de emisiones y en función del cumplimiento del artículo 6 del Acuerdo de París (que también puede conllevar una prima). (*Canal S&P Global Commodity Insights*, 2023).

Volviendo a la descripción de los participantes del MVC, es importante recalcar que, en la mayor parte de los casos, los proyectos de los MVC requieren de actores clave como bancos y empresas de capital privado, de cara a poner en marcha la instalación física del proyecto. Además, los proyectos tienen un operador y propietario, el dueño del lugar físico donde tiene lugar la reducción de emisiones. Otros involucrados importantes son los auditores externos, es decir los validadores y verificadores de los proyectos de reducción de GEI o, las organizaciones de normalización (generalmente ONG), que registran las transacciones de las compensaciones una vez que se emiten y las partes en nombre de las cuales se retiran en última instancia. (Marbough y Stern, 2021).

El siguiente paso, es que los participantes en el mercado acuerdan el precio justo de los créditos mediante la oferta y la demanda. Esta tarea es realizada por intermediarios como los comerciantes, *traders* o las bolsas. En la bolsa se suelen llevar a cabo aquellas operaciones más frecuentes o de grandes volúmenes de productos con contratos o productos estandarizados¹⁴ (*Canal S&P Global Commodity Insights*, 2023). Sin embargo, gran parte del comercio de compensaciones voluntarias de carbono se realiza *over the counter*, es decir, de forma extrabursátil y a través de intermediarios que gestionan transacciones para productos no estandarizados, operaciones ocasionales y pequeños volúmenes. (Marbough y Stern, 2021). Ambas oferta y demanda (como podemos observar en los datos recogidos de la gráfica inferior), han experimentado un notable crecimiento. El crecimiento se evidencia por los aumentos en la emisión de créditos, en el incremento del número de proyectos y en los aumentos en las compras y los retiros (es decir, el uso) de créditos de carbono. (Dyck et al., 2023).

¹⁴ Ejemplos de bolsas incluyen *Carbon Trade Exchange (CTX)*, *European Climate Exchange (ECX)*, *Climate Impact X (CIX)* y *AirCarbon Exchange (ACX)*.

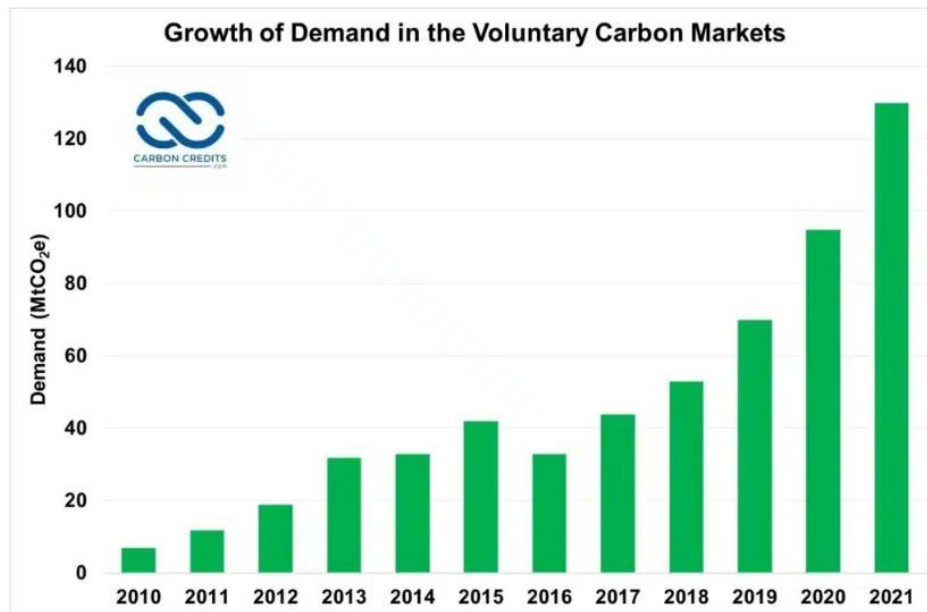


Figura 5: Crecimiento de la Demanda en los Mercados Voluntarios de Carbono" desde el año 2010 hasta el 2021. (Carbon Credits, 2021)

Cabe mencionar, que la mayor parte de la oferta de créditos de carbono se genera en los países en desarrollo y la mayor parte de la demanda de créditos de carbono se produce en los países desarrollados. A continuación, vamos a elaborar más acerca de quiénes están detrás del lado de la oferta y demanda. Encontramos en primer lugar, las empresas privadas que utilizan créditos de carbono para contribuir a sus objetivos climáticos voluntarios o compensar los GEI emitidos. En segundo lugar, los consumidores y agencias públicas, que adquieren créditos de carbono para "neutralizar" actividades contaminantes como viajes o eventos. Y finalmente, hay una parte de la demanda, que proviene de las regulaciones de gobiernos, que permiten a entidades utilizar los créditos del MVC como activos de cumplimiento obligatorio, en virtud de los impuestos al carbono. (Dyck et al., 2023).

Finalmente, los últimos miembros partícipes en este mercado son los *Offset Retailers*. Estos facilitan a consumidores y empresas el acceso a créditos de compensación provenientes de diversos proyectos, ya sea a través de intermediarios o directamente de los creadores del proyecto, ofreciendo así una opción práctica. Finalmente, el proyecto tiene su fin porque el comprador final no revende las compensaciones, sino que declara su retiro en su nombre para "compensar" sus emisiones de GEI. Y esta acción queda registrada en el archivo de la organización de estándares que aprobó dicha emisión de las compensaciones. Por ello una vez retirada, la compensación ya no puede intercambiarse ni retirarse nuevamente. (Marbough y Stern, 2021).

- *Mercado Voluntario de Carbono Hoy*

Por tanto, tras toda esta información recogida, entendemos como hoy los MVC pueden describirse a través de numerosas formas, en función del crecimiento del mercado, geografía, sector y volúmenes de créditos de carbono tramitados y retirados. Respecto a su crecimiento, durante estos últimos cinco años, los MVC han experimentado una participación mayor. Los expertos afirman, que el volumen de créditos podría multiplicarse por quince entre 2020 y 2030. Y según el informe de *Carbon Direct* (2023), las compras de créditos de carbono por parte de demandantes orientados a la calidad y centrados en la eliminación de gases de GEI se multiplicaron por cinco desde 2021 hasta 2023. (Dyck et al., 2023). Ello sumado a que el MVC abarca, en un número mayor de regiones, una gama mucho más amplia de actividades de reducción y eliminación de GEI los mercados de cumplimiento, los regulados, o los operados por los gobiernos. (Marbough y Stern, 2021).

En 2021, los Mercados Voluntarios de Carbono (MVC) captaron el foco de atención durante la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP26) celebrada en Glasgow. Y es que las negociaciones entre los países participantes alcanzaron un hito significativo al lograr un consenso sobre el tan esperado y ampliamente debatido reglamento para el Artículo 6. Este artículo logró especificar las pautas sobre cómo se asignan, utilizan y comercializarán los créditos de carbono en virtud del Acuerdo de París. La resolución de este marco regulatorio representa un avance crucial en la promoción de prácticas sostenibles y la gestión eficaz de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial. Sin embargo, en el año 2022 se vivió una ligera disminución del suministro de créditos en el MVC, como consecuencia de la organización en la determinación de los gobiernos de cómo aplicarán las reglas del artículo 6 del Acuerdo de París, e incluso porque los auditores se vieron abrumados con solicitudes, por lo que se produjeron retrasos en las emisiones de créditos. (Marbough y Stern, 2021).

Los MVC experimentaron un notable crecimiento desde 2019 hasta 2021, con un aumento del 86% en los créditos de VCM en 2021 en comparación con el nivel de 2019. Sin embargo, este impulso se vio afectado en 2022, marcando una desaceleración que continuó en 2023, un año muy desafiante para los MVC debido a problemas de reputación y una baja demanda que ha impactado significativamente en los precios. A pesar de que 2023 registró un récord anual de demanda, el incremento fue solo del dos por ciento en

comparación con el mercado en 2021. La contracción de la demanda se atribuye a la retirada de grandes corporaciones como Shell, Nestlé, EasyJet y Fortescue Metals Group de los planes de compensación de carbono, salidas originadas en un creciente escepticismo sobre la eficacia de dichos proyectos, pues existen preocupaciones sobre los beneficios climáticos reales y acusaciones de *greenwashing*. (Jennifer L, 2024).

Kyle Harrison, jefe de Investigación de Sostenibilidad en BNEF, advierte que el éxito del MVC vendrá determinado por la fortaleza de la demanda y la credibilidad de los créditos. Según Harrison, "No hay escasez de gobiernos e inversores que busquen monetizar las reducciones de emisiones a través de créditos de carbono y canalizar financiamiento hacia proyectos. Pero si los compradores no pueden confiar en la calidad de los créditos que adquieren y se arriesgan a acusaciones de *greenwashing*, el mercado podría resultar en un fracaso y literalmente desaparecer". Por ello será importante resolver las preocupaciones relacionadas con la calidad de los créditos de carbono, la transparencia del mercado y las falsas afirmaciones de neutralidad de carbono para que los nuevos participantes potenciales del mercado lleguen a participar en el MVC a gran escala. Por tanto, si las empresas comienzan a comprar miles de millones de créditos de carbono anualmente, ello elevaría los precios a más de 200 dólares por tonelada y construiría un mercado valorado en más de 1,1 billones de dólares anuales para 2050. (Catsaros, 2024).

Como hemos visto, la calidad del MVC es el mayor desafío clave. Para llegar a soluciones, son los compradores que se centran en aquellos proyectos donde se puede demostrar su calidad, los que pueden guiar el financiamiento e influir en la dirección del mercado. Y no todo son malas noticias, ya que, en el año 2023 ha habido un aumento de cinco veces en el número de compras realizadas por parte de los compradores orientados a la calidad de los proyectos, lo que demuestra un cambio de tendencia importante en este mercado. (Potts, 2023)

- *Futuro del Mercado voluntario de Carbono: Retos y Desafíos.*

El estudio sobre el mercado voluntario de carbono post-2020 destaca una desconexión creciente entre la confianza depositada en los créditos de carbono por las empresas del sector privado y la falta de un consenso entre los principales proveedores del mercado. Además, resalta que no se ha logrado alinear el mercado de carbono voluntario con el Acuerdo de París de manera efectiva y legítima. Para solucionar esto, será indispensable el apoyo de políticas públicas tanto a nivel nacional como internacional, con el fin de

establecer un enfoque robusto y operativo para las futuras actividades del mercado (Kreibich & Hermwille, 2021). Asimismo, para que el MVC sea eficaz y se pueda cumplir con el objetivo de cero emisiones netas para 2030, si se crea un organismo de gobernanza, este podrá supervisar la verificación de proyectos y asegurar la transparencia y confiabilidad del mercado. (Cho, 2023)

Sumado a la inexistencia de un marco legal estandarizado para el MVC, por lo tanto, la incertidumbre sobre la transparencia y calidad de los créditos de carbono está siempre presente. Otro desafío que hay que afrontar para fortalecer el MVC, es la falta de metodologías comunes para validar y contabilizar las reducciones de carbono. De modo que, debido a la limitación de comercio de créditos entre diferentes registros, hay una fragmentación del mercado que dificulta la eficiencia global del mismo. Otra recomendación indispensable, es el desarrollo de contratos de referencia que establezcan precios estables para los créditos de carbono, facilitando así que los participantes del mercado realicen estimaciones financieras más exactas. Finalmente, para potenciar la transparencia y eficiencia del mercado, se propone la instauración de una plataforma digital unificada que administre registros, información del mercado y procesos de verificación de proyectos. (Cho, 2023).

Para concluir el análisis sobre el futuro de los MVC, recalcar que el VCM no debe considerarse como un sustituto único para para alcanzar la trayectoria de 1.5°C. Los MVC deben ser un complemento a los objetivos ambiciosos de las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDCs) o a la implementación de acciones gubernamentales robustas y políticas efectivas para alcanzar los objetivos de reducción de emisiones. (De Boever, 2023). Son los propios países los que deben evaluar, en función de sus capacidades y circunstancias nacionales, que aportaciones podrán hacer en la lucha frente al cambio climático. Pues tras el Acuerdo de París (2016) aquellos países que ratificaron el acuerdo, tienen la obligación de poner en marcha políticas y medidas nacionales (NDCs), para alcanzar dichos objetivos de reducción de emisiones y por ello elaborar planes de lucha contra el cambio climático, que cada cinco años comunican a Naciones Unidas. (Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, s.f.)

Por lo tanto, el VCM proporciona a los países y empresas un mecanismo para ir más allá de sus compromisos de las NDCs y emprender voluntariamente medidas adicionales para reducir emisiones. El MVC debe ser visto como una herramienta complementaria, útil para compensar las emisiones inevitables a corto plazo y para contrarrestar las emisiones

residuales. Estas son aquellas que persisten incluso después de que se hayan implementado medidas extensivas para reducir las emisiones directas durante los últimos años de un plan cero emisiones netas. Además, las afirmaciones climáticas corporativas siempre deben priorizar las reducciones de emisiones dentro de su cadena de valor y los créditos de carbono deberían emplearse en paralelo a iniciativas de reducción de emisiones y no como la principal estrategia para cumplir con los objetivos climáticos. (De Boever, 2023)

3. MARCO TEÓRICO, OBJETIVOS E HIPÓTESIS Y METODOLOGÍA

A lo largo de este apartado del TFG, explicamos como se teorizan las cuestiones abarcadas en el trabajo de fin de grado. Construimos un marco de referencia para la posterior formulación de los propósitos de la investigación y para la subsiguiente interpretación del análisis y discusión. Por lo tanto, para la fundamentación teórica de los Mercados de Emisiones, recogemos los planteamientos conceptuales enmarcados en aquellas Teorías de las Relaciones Internacionales (TRI), que tengan en relación con la existencia internacional de los mercados de emisiones.

Comenzamos a través del liberalismo como teoría de las relaciones internacionales. El liberalismo ofrece una perspectiva que explica los mercados de emisiones, al enfatizar la cooperación entre estados y la importancia de las instituciones internacionales en la gestión de los problemas globales. Además, esta perspectiva apoya que, mediante acuerdos internacionales e implementación de políticas de mercado como el comercio de emisiones, los países pueden superar sus diferencias y trabajar conjuntamente en combate hacia el cambio climático, beneficiándose mutuamente durante el proceso. Porque desde el marco liberal, estas iniciativas no solo se ven impulsadas por la responsabilidad ética de proteger el medio ambiente, sino también por el reconocimiento de que, a largo plazo, la salud del planeta es indispensable para el bienestar económico y la estabilidad política global. (Griffiths, 2007)

Por otro lado, otra de las teorías de las Relaciones Internacionales que se ajusta al tema del medio ambiente en la agenda global, es la teoría sobre el Gobierno de los Comunes

Globales. Los denominados “Comunes Globales”, son definidos como las áreas y recursos que escapan a la jurisdicción soberana (océanos, Antártida, espacio exterior, atmósfera, etc). Por ello, bajo esta teoría, el medio ambiente se enmarca como un bien público global que debe ser gobernado de manera efectiva y sostenible. Por tanto, para evitar la “tragedia de los comunes”¹⁵ que, en este caso, es la atmósfera como bien común siendo explotado por cada parte, para garantizar maximizar el beneficio económico. En otras palabras, esto es mediante la emisión de los gases de efecto invernadero derivados de actividades económicas como la manufactura, transporte, y producción de energía. Pero llega un punto en el que el beneficio privado conduce al coste público, que es cuando, los niveles de emisión colectivamente superan la capacidad de la Tierra para absorber y procesar estos gases sin cambios climáticos adversos. (Rico, 2020).

Dada la naturaleza global del problema, la solución requiere cooperación internacional, lo cual es difícil de lograr. Los países tienen diferentes capacidades económicas, niveles de desarrollo y prioridades políticas, lo que puede llevar a conflictos de intereses y a la inacción. Por ello, de la mano de los mercados de emisiones como forma de cooperación internacional, y bajo el escrutinio de ciertas instituciones y normas comunes, se ofrece una nueva perspectiva de cooperación, que está bajo la gobernanza medioambiental al cumplir con el Acuerdo de París (2015). (Rico, 2020).

En función con los conocimientos previos que tenemos, el objetivo de este TFG es explorar las variables usuales contribuyentes en las economías, que influyen en las emisiones de CO₂. Posteriormente el objetivo es analizar estas variables de GEI, a la luz de papers académicos, para poder clasificarlas como variables de control, dependientes, o variables descriptivas. Y finalmente, de la preocupación mundial para limitar el calentamiento global a 1,5 °C, nace nuestra hipótesis:

“los mercados de emisiones son una herramienta que cuando se establece en un país, lleva a una reducción de emisiones”.

En este apartado del TFG, vamos a explicar la metodología utilizada para abordar la investigación. Los procedimientos y técnicas específicas que han sido utilizadas son en primer lugar, la revisión de la bibliografía. Las fuentes utilizadas han sido: artículos periodísticos, Informes y Comunicados de Organismos Internacionales, Estudios Académicos y Artículos Científicos,

¹⁵ “Tragedia de los comunes”: Concepto desarrollado por Garrett Hardin en su ensayo de 1968.

Información Específica de Empresas y Mercados, Análisis y Blogs Especializados. Todo este conjunto de fuentes comprende un amplio espectro de información relevante para entender los mercados de carbono, las políticas climáticas y los impactos del cambio climático globalmente.

En segundo lugar, los datos numéricos de la información sobre las variables han sido generados y proceden todos del Banco Mundial. Excel ha sido una herramienta fundamental en el trato de los datos para la generación de gráficas en las que ver y comparar la evolución en el tiempo entre las variables que influyen en el proceso del calentamiento global.

Y, en tercer lugar, la herramienta de Stata/Gretl, ha sido utilizada para estimar en datos, si la presencia del Mercado de emisiones reduce las emisiones y en qué medida.

4. ANÁLISIS DESCRIPTIVO / EXPLORATORIO

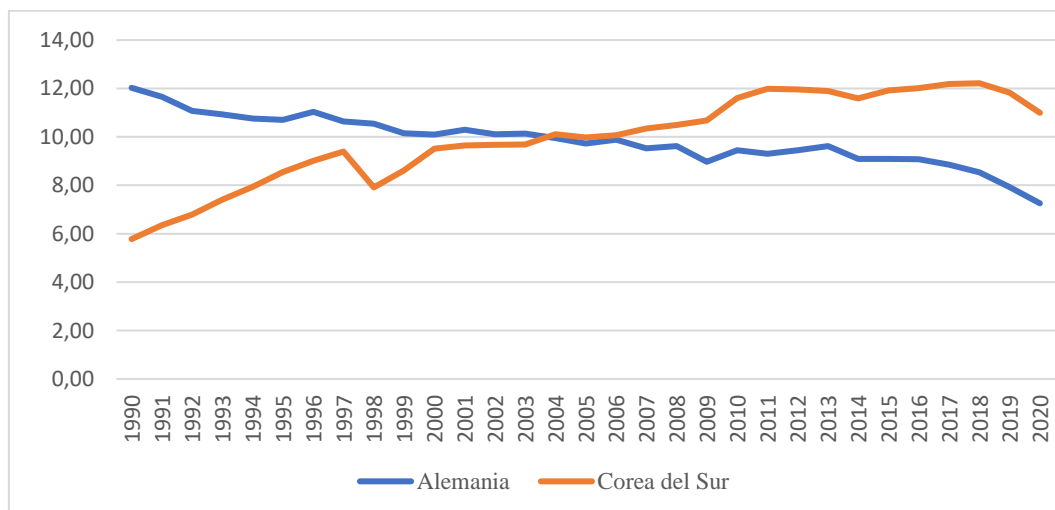
Continuar con nuestra hipótesis supone, aparte de haber profundizado acerca del futuro del mercado voluntario de carbono en términos de su cotización y tamaño; el objetivo de este TFG implica también el análisis del impacto del MVC en la reducción y eliminación de emisiones. Por ello, para llegar a una perspectiva integral sobre la efectividad e importancia del MVC en el impulso de la acción climática, tenemos que demostrar que el MVC es una herramienta efectiva para la descarbonización. A continuación, vamos a seleccionar aquellas variables que juegan un papel importante y están relacionadas con las emisiones de GEI, el desarrollo sostenible y el mercado de emisiones. El estudio de estas variables en términos de sus datos históricos y su relación entre ellas nos permite elaborar un análisis descriptivo y desarrollar la hipótesis de que este mercado, lleva a reducir las emisiones totales. Hipótesis, que luego se demostrará o se probará incorrecta con el uso de la técnica estadística de la regresión lineal.

En análisis descriptivo comienza con la figura inferior (figura 6), la cual nos muestra la comparativa de la evolución de emisiones de CO₂ en toneladas métricas per cápita entre 1990-2020 en Alemania y Corea del Sur. Comenzando por Alemania, podemos ver una tendencia decreciente de las emisiones de CO₂. Afirmamos que en su caso, la mayor parte de las emisiones están relacionadas con la quema de combustibles fósiles como carbón, petróleo y gas natural para la producción de electricidad y calor y transporte. (Germany, Countries & Regions - IEA, s. f.). Además, consideramos la participación de Alemania en los mercados como componente clave en su estrategia para reducir las emisiones de

gases de efecto invernadero y cumplir con sus compromisos climáticos internacionales. Especialmente desde 2005, cuando empezó a participar a través del sistema de comercio de emisiones de la Unión (EU ETS). (Ritchie & Rosado, 2022).

La trayectoria para las emisiones de Corea del Sur es sin embargo creciente. Lógicamente, las emisiones de CO2 per cápita tienden a ser mayores en países económicamente más desarrollados, pero también pueden variar mucho según la estructura de la economía y el sistema energético. Por lo tanto, se puede dar explicación a la evolución de las emisiones de Corea del Sur desde 1990 hasta hoy, debido a la intensa industrialización y el crecimiento económico vividos por el país durante dicho período. Por otro lado, el inicio del repunte de la tendencia decreciente está ligado a los resultados del compromiso de Corea del Sur con el Acuerdo de París (ratificado en 2016) y a la implementación de Corea de su propio sistema de comercio de emisiones (ETS) en 2015. Por lo tanto, podríamos afirmar que las tendencias parecen sugerir que el mercado ha tenido un efecto positivo. (Gabbatiss, 2020)

Figura 6: comparativa de la evolución de las emisiones de CO2 en toneladas métricas per cápita entre 1990-2020 en Alemania y Corea del Sur. Datos obtenidos de Banco Mundial 2024.



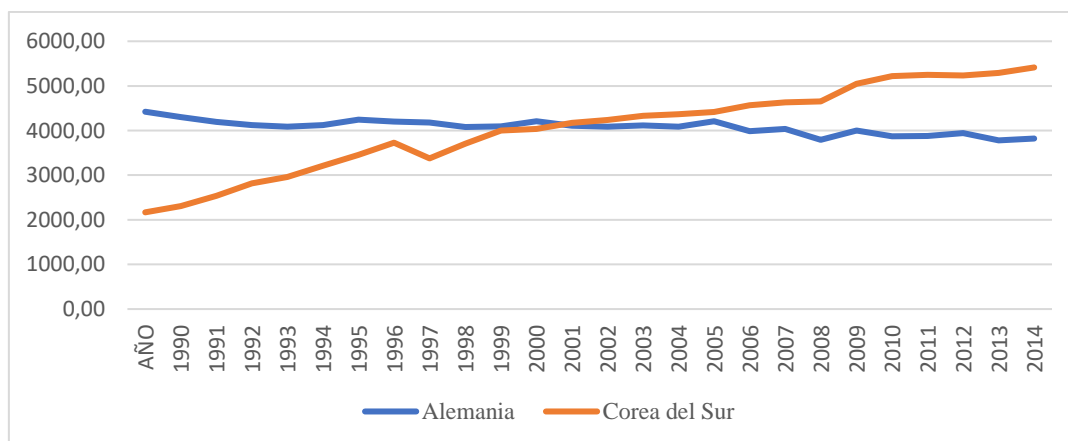
A continuación, iniciamos la comparativa del consumo de energía primaria en ambos territorios. El estudio de esta variable se considera oportuno porque indica el consumo de cada país antes de la transformación en otros combustibles finales.¹⁶ La línea asociada a

¹⁶ Esto equivale a la producción nacional más las importaciones y las variaciones de existencias, menos las exportaciones y los combustibles suministrados al transporte internacional. (Agencia Internacional de la Energía, s.f.)

la República de Corea muestra un aumento y crecimiento constante del uso de energía a lo largo de los años. Esta tendencia ascendente refleja su período de rápido crecimiento económico e industrialización, acompañado del correspondiente aumento en el consumo de energía.

Por otro lado, la línea que representa a Alemania muestra un patrón más estable y ligeramente oscilante, con una tendencia ligeramente decreciente hacia el final del período, pero manteniéndose en gran medida alrededor de los 4 millones. Estos datos se pueden explicar por el nivel actual de madurez económica de Alemania, donde el crecimiento no necesariamente se traduce en un aumento del uso de energía. Ello puede atribuirse a avances en tecnología, mejoras en la eficiencia energética y un cambio en las actividades económicas hacia industrias menos intensivas en energía. (Wettengel, Haas, Appunn, 2024). Además, Alemania ha mantenido un consumo de energía per cápita estable debido a políticas de eficiencia energética y en consecuencia de un cambio hacia fuentes de energía más limpia. Es más, la transición su transición energética, comúnmente denominada "Energiewende" hacia fuentes renovables, es una de las mayores explicaciones de su estabilidad en el uso de energía per cápita, con el consecuente menor impacto en las emisiones de GEI. (IEA, 2020).

Figura 7: comparativa de la evolución del uso de energía (en kg de equivalente de petróleo per cápita), entre 1990-2014 entre Alemania y Corea del Sur. Datos obtenidos de Banco Mundial 2024.

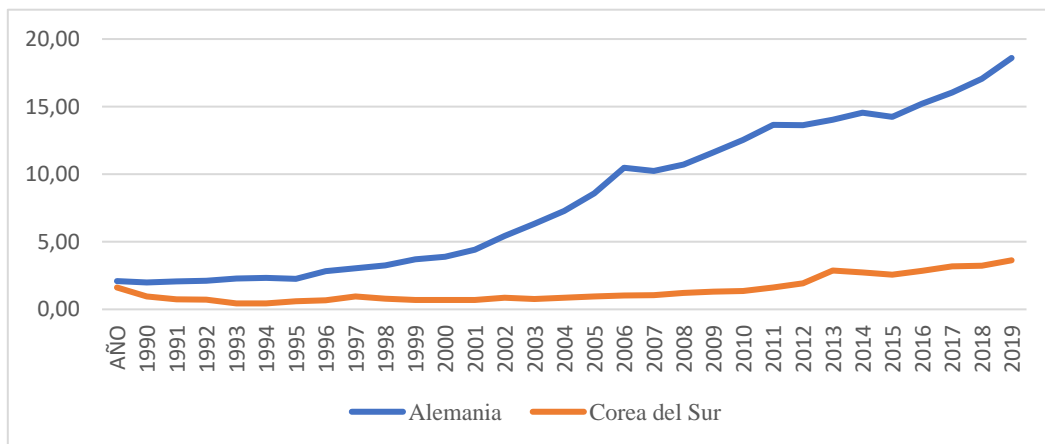


A continuación, nos centramos en el uso de energías renovables de ambos países, ya que esta variable también es influyente en el nivel de emisiones de GEI. Lo que aparece reflejado en el gráfico inferior, corresponde a la proporción del consumo de energía renovable, en el consumo total de energía final. Como hemos analizado, el uso de energía no ha cambiado tanto en Alemania, sin embargo, también hemos visto que la evolución de las emisiones ha sido mayor en su tendencia decreciente. Por ello, la explicación

respecto a este cambio se traduce en la transición alemana hacia energías más verdes. Es más, Hansen, Mathiesen, & Skov, en un estudio llevado a cabo en 2019, analizaron y afirmaron la transición del sistema energético completo de Alemania hacia un futuro basado exclusivamente en energías renovables para el año 2050.

En el caso de Corea del Sur, se observa que ha tenido un crecimiento más moderado en este ámbito. Como afirma un estudio de Kaya, Walasek y Kochański (2023); a pesar del crecimiento económico y el aumento poblacional que generan más emisiones de CO₂, un cambio estratégico de Corea del Sur hacia las energías renovables podría mitigar este impacto. Sin embargo, los datos todavía no reflejan estos cambios debido a los desafíos que enfrenta Corea del Sur. Hablamos de su dependencia histórica a combustibles fósiles y energía nuclear y las sustanciales inversiones llevadas a cabo en infraestructuras de energía no renovable. Lo que dificulta pasar a fuentes de energía más sostenibles. (Kaya, Walasek, & Kochański, 2023)

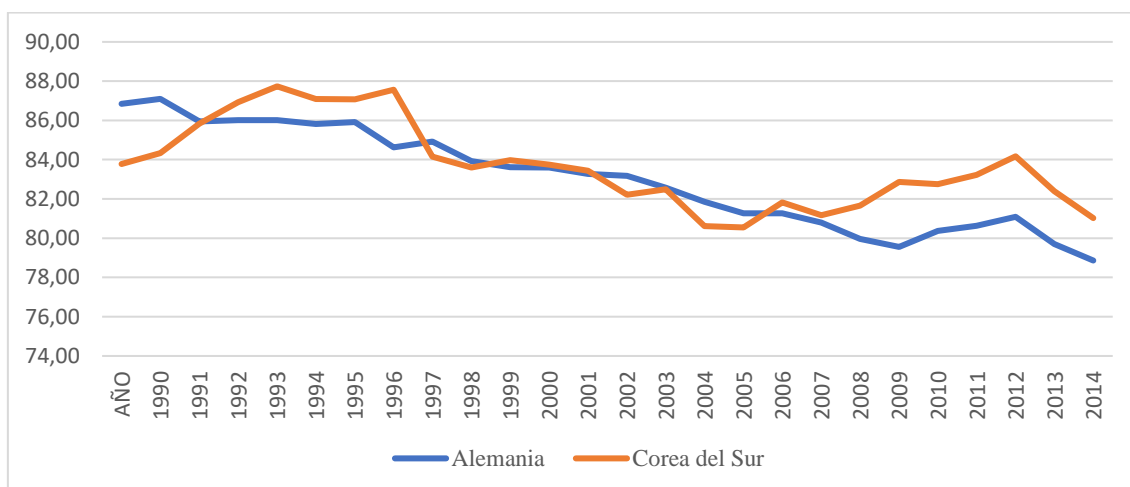
Figura 8: comparativa de la evolución del consumo de energía renovable (% del consumo total de energía final), entre 1990-2019 entre Alemania y Corea del Sur. Datos obtenidos de Banco Mundial 2024.



Respecto a la gráfica resultante del análisis de los datos del consumo de energía procedente de combustibles fósiles¹⁷ (como % del total), vemos como en ambos la tendencia general es descendiente. Cabe destacar que hay un repunte en 2004 en Corea. Este hecho, de alguna manera explica la última subida en la evolución del CO₂ per cápita que hemos visto anteriormente. Que se debe a que como Corea no tenía mercado, no había incentivos para acudir hacia la tecnología verde.

¹⁷ (El combustible fósil comprende los productos de carbón, aceite, petróleo y gas natural.) (Banco Mundial, 2024)

Figura 9: comparativa de la evolución del consumo de energía procedente de combustibles fósiles (% del total), entre 1990-2014 entre Alemania y Corea del Sur. Datos obtenidos de Banco Mundial 2024.



Finalmente, cabe concluir con el estudio de la evolución del gasto en I+D y de la evolución del GDP per cápita, para ver cómo estos han podido influir en concreto en las emisiones per cápita de los dos países seleccionados. Al analizar los gráficos inferiores, observamos cómo la trayectoria de crecimiento del PIB per cápita y el gasto en I+D de Alemania y Corea del Sur desde finales del siglo XX hasta principios del siglo XXI refleja un compromiso sostenido con la innovación y el desarrollo económico. Aunque ambos países muestran una evolución positiva en su PIB per cápita, el gasto en I+D revela una estrategia diferenciada.

Es posible inferir que este gasto, al incluir inversiones en tecnologías limpias y eficiencia energética, tiene una correlación con la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Estudios académicos como los de Choi y Anadón (2014) y Lee y Min (2015) han demostrado que la inversión en I+D, especialmente en sectores como la energía verde y la digitalización, es clave para el desarrollo de tecnologías que contribuyen a la reducción de la huella de carbono. Si bien los efectos de estas inversiones pueden no ser inmediatos, a largo plazo podrían significar una disminución considerable de los GEI, lo cual es esencial en la lucha contra el cambio climático. La sinergia entre crecimiento económico, a través del PIB per cápita, y la inversión en I+D puede, por tanto, ser considerada un motor para el desarrollo sostenible y la transición hacia economías bajas en carbono.

Figura 10: comparativa del gasto en investigación y desarrollo (% del PIB): entre 1996-2014 en Alemania y Corea del Sur. Datos obtenidos de Banco Mundial 2024.

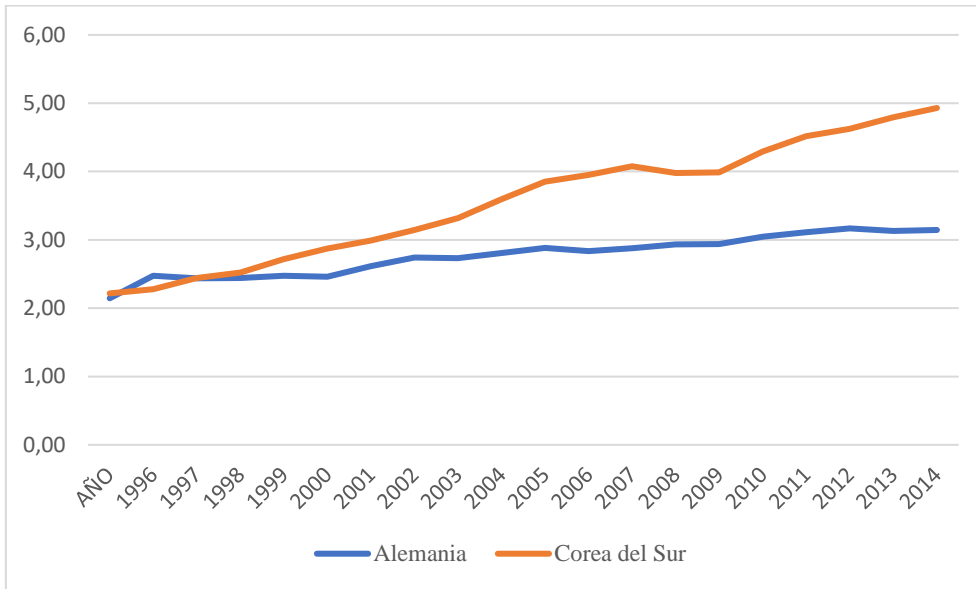
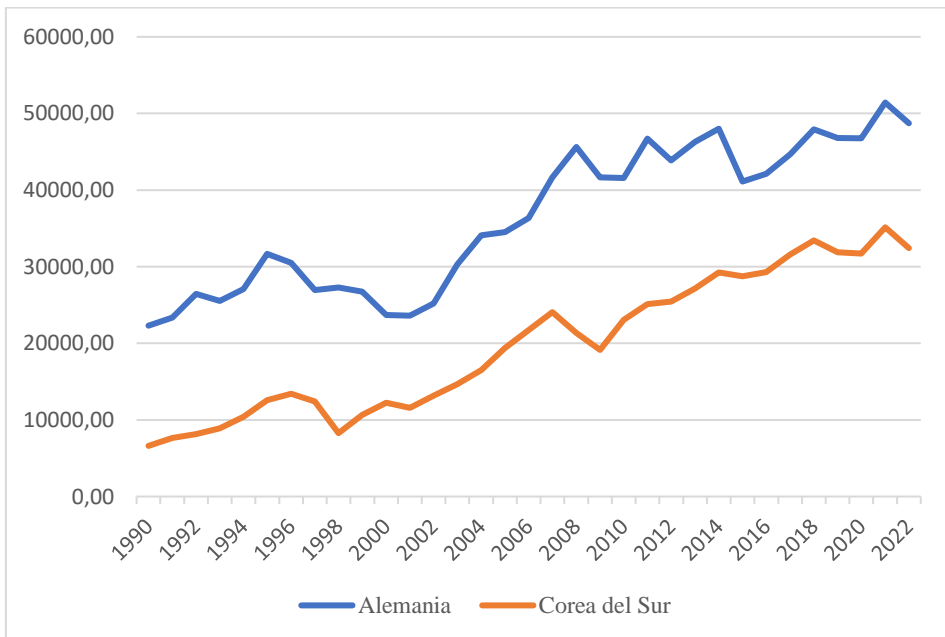


Figura 11: comparativa de la evolución del PIB per cápita (current US\$), entre 1990-2022 entre Alemania y Corea del Sur. Datos obtenidos de Banco Mundial 2024.



5. ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL (REGRESIÓN)

A. ECUACION DE LA REGRESIÓN LINEAL

Para explicar en qué medida la presencia del Mercado de Emisiones reduce, según los datos recabados en el análisis descriptivo, las emisiones de CO₂, llevamos a cabo una regresión lineal. Teniendo en cuenta que, en la estadística la variable CO₂ es continua, comenzamos expresando esta variable en forma de logaritmo en las regresiones. Asimismo, la regresión es una función que depende de una constante (α) más un parámetro beta (β), que se sirve de la presencia o no presencia del mercado de emisiones. Y a la ecuación anterior también se le suman otras variables de control (δ): PIB per cápita, tasa de crecimiento de la población y consumo de energía fósil.

$$\text{Log}(CO_2 \text{ pc}) = \alpha + \beta(\text{mercado de emisiones}) + \delta(x)$$

$$\beta = 1, \text{ cuando hay mercado}$$

$$\beta = 0, \text{ no hay mercado}$$

Estas variables de control han sido seleccionadas porque las emisiones de un país están explicadas por la actividad económica (PIB pc), el consumo de energía y el crecimiento poblacional. Esta afirmación se sujeta al estudio de Osobajo et al. (2020), en el que se afirma que el crecimiento económico y el consumo de energía, están significativamente relacionados con las emisiones de CO₂. Para llegar a esta declaración utilizaron el análisis de regresión, la causalidad de Granger y pruebas de cointegración en datos recogidos de más de setenta países diferentes, entre los años 1994 y 2013. Los resultados a los que llegaron muestran una relación causal bidireccional entre el crecimiento económico y las emisiones de CO₂, mientras que el consumo de energía tiene una relación unidireccional con las emisiones. En otras palabras, afirma la idea de que el crecimiento económico y el consumo de energía son factores significativos en las emisiones de CO₂. (Osobajo et al, 2020).

Finalmente, hay que destacar que es importante tener en cuenta que las regresiones no incorporan efectos fijos de año. Y que el objetivo de la regresión econométrica de este TFG es conseguir los parámetros α , β y δ , que de momento desconocemos. Queremos especialmente descubrir el valor de β , para poder confirmar nuestra hipótesis.

Por ello antes de ningún cálculo, replanteamos la hipótesis a la luz de la ecuación:

$$\beta > 0$$

→ La presencia de mercado, aumenta positivamente las emisiones.

→ No esperamos que esto suceda.

$$\beta < 0$$

→ El mercado de emisiones, lleva a reducir las emisiones. Esta es nuestra hipótesis.

→ Esperamos que suceda.

$$\beta = 0$$

→ No hay efecto de los mercados de emisiones. Porque la ecuación resulta 0.

B. ESTADÍSTICOS VARIABLES

A continuación, presentamos la tabla que recoge todas las características de las variables a utilizar.

TABLA DE VARIABLES					
Variables	Descripción	Tipo	Media	Desvío Estandar	Fuente
Mercado de emisiones	emission_markets		0,470	0,503	Banco Mundial
PIB pc	gdp_pc	Variable de control	28146,970	12422,220	
Tasa crecimiento de la población	pop_growth		0,004	0,004	
Consumo total energía	consumo_total		4058,589	684,283	
CO2 pc	c02_pc	Variable dependiente	0,908	1,480	
Consumo total de energía renovable		Análisis descriptivo			
Gasto en I+D					
Consumo de energía fósil					

Figura 12.: Tabla de variables estadísticas: Elaboración propia a raíz de los datos derivados de la regresión. Procedentes a su vez del Banco Mundial.

C. REGRESIÓN LINEAL

TABLA DE REGRESIONES				
REGRESIONES	(i)	(ii)	(iii)	(iv) Aplicando efectos por país
Valor de la constante (α)	-0,103 [0,445]	0,259 [0,518]	0,649*** [0,194]	1,700*** [0,171]
Valor del Mdo de emisiones ($0 \geq \beta \leq 1$)	-0,176*** [0,048]	-0,148*** [0,048]	-0,075*** [0,221]	-0,060*** [0,012]
Log (PIB pc)	0,244*** [0,045]	0,206*** [0,051]	0,095*** [0,23]	-0,028 [0,020]
Tasa crecimiento de la población		0,959 [4,843]		2,061* [1,127]
Consumo total energía			0,000*** [0,000]	0,000*** [0,171]
R - squared	0,328 33%	0,251 25%	0,905 91%	0,963 96%
Observaciones	62	60	52	50
Nota 1: *** p < 1% ; ** p < 5% ; *p<10%				
Si no hay asterisco no son significativas				
Nota 2: [desvío estandar]				

Figura 13.: Tabla de regresión lineal. Elaboración propia a raíz de los resultados de Stata, con datos derivados del Banco Mundial.

Tomando como referencia los datos recogidos y tratados por Stata (ver anexo), elaboramos una tabla con las conclusiones (ver Figura 12). El primer resultado es congruente con nuestra hipótesis: “La presencia del mercado de emisiones reduce las emisiones de CO₂” está soportada por la evidencia de mi análisis. Porque se demuestra ya que, a partir de que aparecen los mercados de emisiones en Alemania y Corea del Sur, las emisiones bajan porque β es negativa.

Por otro lado, vemos que el mercado por sí solo no explica nada. Por eso introducimos las variables de control, porque necesitamos controlar las diferencias entre los dos países escogidos. La idea es poder demostrar que, si incluimos variables de control, el resultado se mantiene.

1. En el primer escenario hacemos la regresión lineal únicamente con la variable de PIB per cápita, ya que como expusimos anteriormente según la literatura, es la variable que más determina. Por lo tanto, que β pase de 0 a 1, es decir, la aparición

de un mercado de emisiones va a generar que las emisiones per cápita se reduzcan en un 17%.

2. En el segundo escenario, mantenemos dicha variable de control (PIB per cápita) porque es significativa. Sin embargo, como vemos, no sucede igual en esta regresión con la tasa de crecimiento de la población, pues la cifra (0,959) nos indica que no es significativo.
3. Pasamos al tercer escenario, donde mantenemos el PIB pc, olvidamos crecimiento poblacional y añadimos el consumo de energía que si nos da un resultado significativo.
 - En el caso de usar la variable de consumo total de energía renovable, deja de ser significativo el valor de emisiones de mercado, porque el efecto se va todo a consumo renovable. El problema surge porque estas dos variables están vinculadas entre sí. No pueden estar juntas, habría solapamiento de información (una sola variable captura todo). Por lo tanto, dejamos la variable del consumo total de energía renovable únicamente para el análisis descriptivo.
 - Tampoco funciona en las regresiones que el consumo sea fósil. Porque esta variable está totalmente relacionada con las emisiones de mercado. Y lo mismo ocurre si utilizamos los datos de la inversión en I + D de un país como variable en la regresión, pues da resultados incoherentes.
4. El último escenario parece ser la mejor regresión; es donde encontramos las variables más importantes que explican las emisiones.
 - La explicación de esta afirmación procede de R cuadrado (que va de 0 a 1) y nos indica, que porcentaje de la variable de emisiones se explica definitivamente con las otras variables incluidas en la regresión. En otras palabras, qué porcentaje de lo que pasa con el log (CO2 PC) es bien explicado por mi modelo.
 - Por ejemplo, el set de variables escogidas para explicar la primera ecuación es capaz de explicar un 33 por ciento de lo que pasa con las emisiones. Es decir, si explica una parte importante, pero faltan otras cosas.
 - Asimismo, la cuarta regresión incorpora una variable binaria como control, para identificar el país. Es decir, Alemania y Corea del Sur tienen entonces un constante adicional particular, que toma valor dependiendo de si la observación

es de Corea o Alemania. Aunque el valor de estas constantes no las representamos en la tabla, si influye a la hora de elegir los resultados definitivos.

- Por lo tanto, entendemos por qué el cuarto escenario es el mejor. Y es que el modelo de la última columna es capaz de predecir en un 96 por ciento, lo que ocurre con las emisiones: el coeficiente sugiere que reducimos las emisiones en un 6,01%. Por lo tanto, llegamos al parámetro oficial con el que continuar el análisis.

La investigación nos permite afirmar, que de los tres posibles escenarios para β , el de $\beta < 0$ va a ser el real. Lo que cuadra con mi hipótesis y plan de investigación. Pasamos de un primer escenario donde, el -0,176 estaba un poco sobreestimado. A un último y definitivo, (la cuarta columna), el mejor para seleccionar como nuestro resultado.

Concluimos el análisis afirmando que la presencia del Mercado de emisiones reduce según los datos, las emisiones en un 6,01%.

RECOMENDACIONES PARA QUE EL MVC SEA EFECTIVO EN LA DESCARBONIZACION

Según estimaciones del IPCC, para evitar un incremento de 1,5 °C en la temperatura global, será necesario eliminar entre 6 y 10 gigatoneladas (Gt) de dióxido de carbono de forma anual de aquí a 2050. Y además, se requerirá también la absorción de más de una gigatonelada de CO₂ cada año para 2030. En este contexto, el mercado voluntario de carbono desempeña un papel crucial al facilitar la implementación a gran escala de soluciones para la captura de dióxido de carbono. (Potts, 2023). Sin embargo, este presenta una serie de desafíos que deben ser tenidos en cuenta, para que efectivamente sea una herramienta útil en la descarbonización.

El estudio realizado por Thallo en el año 2022, nos presenta los tres claros desafíos a solucionar para lograr escalar el mercado voluntario de carbono. El primero está relacionado con los programas de acreditación y las Entidades de Validación y Verificación (VVB), ya que estos han creado cuellos de botella significativos que ralentizan e interrumpen el correcto funcionamiento del mercado voluntario de carbono.

La eliminación de los actuales tiempos de espera necesarios para la validación y verificación podría agilizar notablemente el proceso, llegando a duplicar la velocidad con la que se emiten los créditos de carbono en el MVC. Además, se estima que de aquí al año 2030, los retrasos relacionados con la verificación tendrán un coste económico considerable para los desarrolladores de proyectos, alcanzando los \$2.6 mil millones. Además, se prevé que estos retrasos impidan la emisión de aproximadamente 4.8 gigatoneladas (GT) de créditos de carbono. (Beken, 2023).

En segundo lugar, otro obstáculo importante actual en los Mercados Voluntarios de Carbono es la financiación, especialmente para los desarrolladores de proyectos de tamaño pequeño a mediano o el acceso limitado a financiación para los proyectos en etapas tempranas. Ya que, en la actualidad, las formas de financiación más prevalentes incluyen los acuerdos de compra anticipada y la financiación propia. Sin embargo, según encuestas realizadas en el sector, el 90% considera que los productos a plazo serán fundamentales para lograr escalar el mercado de carbono voluntario. (Beken, 2023).

Finalmente, el último aspecto relevante del mercado es la significativa captura de valor por parte de los intermediarios: inversores, corredores y minoristas. Estos actores representan aproximadamente un tercio del precio promedio de los créditos de carbono, (lo que se tradujo, por ejemplo, en unos \$650 millones en el año 2021). Este fenómeno muestra la influencia y el poder económico que los intermediarios tienen dentro del mercado, ya que capturan una parte considerable de los ingresos generados por la emisión de créditos de carbono. Destacando por ello, la necesidad de reconsiderar la estructura de costes y la redistribución del valor generado en la comercialización de créditos de carbono. (Beken, 2023).

Por ello, es crucial reconocer que el éxito y la capacidad de escalabilidad del MVC dependen del establecimiento de la integridad del mercado, que hoy se ha convertido en el talón de Aquiles de estos mercados no regulados. Si la integridad del mercado flaquea y no se logra atraer a compradores y desarrolladores de proyectos, el MVC podría llegar a dejar de funcionar de forma efectiva. Por lo tanto, es prioritario mejorar la integridad del mercado y construir confianza como primer paso para asegurar que el MVC pueda escalar y convertirse en una herramienta efectiva para la descarbonización. Es más, las iniciativas en curso necesitan urgentemente encontrar un consenso para establecer una señal fuerte de confianza y atraer a los interesados. Solo entonces el mercado voluntario

de carbono puede convertirse en una herramienta efectiva para la descarbonización. (De Boever, 2023).

CONCLUSION

En este último apartado del TFG, confirmamos nuestra hipótesis: efectivamente, las emisiones de un país están explicadas por la actividad económica (PIB pc), el consumo de energía y el crecimiento poblacional. (En las regresiones se demuestran estos parámetros como significativos). Además, mediante la regresión lineal, se demuestra que desde la implantación de los mercados de emisiones en Alemania y Corea del Sur, las emisiones bajan porque β es negativo. Por ello, con el modelo de regresión al que llegamos finalmente, es capaz de predecir en un 96 por ciento, lo que ocurre con las emisiones. Estas se reducen en un 6,01% desde que ambos países entraron por primera vez en un mercado de carbono hasta día de hoy.

Esta investigación busca dar salida al mercado de carbono como una respuesta al problema de que la temperatura media global no alcance el límite del calentamiento global a 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales. Afirmamos, que la presencia del Mercado de emisiones reduce según los datos, las emisiones en un 6,01% y por lo tanto, esta reducción nos indica que se podría llegar a una neutralidad de carbono, que estabilizaría la temperatura global y la lograría la reducción a cero de las emisiones netas de CO₂. Dejamos como futura cuestión a resolver, si solo con los mercados de emisiones, se podría llegar a unas “emisiones negativas netas”, es decir que la cantidad de CO₂ emitida a la atmósfera fuera menos que la cantidad retirada. O si fueran necesarias más herramientas para ello.

Concluir con que efectivamente, los países están actuando en consonancia con el acuerdo de París en la búsqueda de cumplir con el compromiso de reducir sus emisiones de GEI. El objetivo ideal sería llegar a un nuevo equilibrio donde la concentración de CO₂ en la atmósfera disminuiría lentamente, mediante el proceso de redistribución y absorción de las emisiones de CO₂ por los océanos y la biosfera de la tierra. Por ello solo el futuro y las acciones que tomemos ahora, determinarán si las dudas sobre la credibilidad del mercado voluntario de carbono serán más fuertes o si dejarán de obstaculizar el exceso de oferta existente por parte de las corporaciones que buscan neutralizar sus emisiones mediante compensaciones de carbono. Pues simplemente con una regulación más estricta los mercados voluntarios de carbono podrían crecer exponencialmente en las próximas décadas y aborden cualquier emisión residual que no pueda reducirse por otros medios, como hemos demostrado en Alemania y Corea del Sur, con la regresión lineal.

BIBLIOGRAFÍA

Alemania - Emisiones de CO2 1990. (s. f.). Datosmacro.com. <https://datosmacro.expansion.com/energia-y-medio-ambiente/emisiones-co2/alemania?anio=1990>

A look at the 2023 voluntary carbon market | Carbon Direct. (s. f.). <https://www.carbon-direct.com/insights/state-of-the-voluntary-carbon-market-2023>

BloombergNEF. (2024, 6 febrero). Carbon Credits Face Biggest Test Yet, Could Reach \$238/Ton in 2050, According to BloombergNEF Report | BloombergNEF. BloombergNEF. <https://about.bnef.com/blog/carbon-credits-face-biggest-test-yet-could-reach-238-ton-in-2050-according-to-bloombergnef-report/?ref=csfutures.com>

BloombergNEF. (2022, 16 septiembre). The Untapped Power of Carbon Markets in Five Charts | BloombergNEF. BloombergNEF. <https://about.bnef.com/blog/the-untapped-power-of-carbon-markets-in-five-charts/>

Chen, S., Marbough, D., Moore, S., & Stern, K. (2021). Voluntary Carbon Offsets: An Empirical Market study. Social Science Research Network. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3981914>

Cho, W. (2023, 14 enero). Challenges of the Voluntary Carbon Market and Ways to Improve. <https://www.linkedin.com/pulse/challenges-voluntary-carbon-market-solutions-woori-cho/>

Compliance vs voluntary: Carbon markets explained. (s. f.). <https://www.eon.com/en/innovation/future-of-energy/energy-and-beyond/compliance-vs-voluntary-carbon-markets-explained.html>

De Boever, E. (2023). Voluntary carbon markets: An effective tool for decarbonization? [Master's dissertation, Universiteit Gent]. https://libstore.ugent.be/fulltxt/RUG01/003/144/420/RUG01-003144420_2023_0001_AC.pdf

Dyck M, Streck C & Trouwloon D (2023). “El ABC del Mercado Voluntario de Carbono”. VCM Prime. <https://vcmprimer.files.wordpress.com/2023/11/vcm-explained-chapter1-spanish.pdf>

Favasuli, S., & Sebastian, V. (2021, June 10). Voluntary carbon markets: how they work, how they're priced and who's involved. S&P Global Commodity Insights. <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/blogs/energy-transition/061021-voluntary-carbon-markets-pricing-participants-trading-corsia-credits>

Gabbatiss, J. (2021, 11 octubre). The Carbon Brief Profile: South Korea. Carbon Brief. <https://www.carbonbrief.org/the-carbon-brief-profile-south-korea/>

Garrigues. (2023, 2 mayo). Publicada la ley en materia de información no financiera y diversidad en España. Garrigues. https://www.garrigues.com/es_ES/noticia/publicada-la-ley-en-materia-de-informacion-no-financiera-y-diversidad-en-espana

Germany 2020 – Analysis - IEA. (2020, 1 febrero). IEA. <https://www.iea.org/reports/germany-2020>

Germany - Countries & Regions - IEA. (s. f.-b). IEA. <https://www.iea.org/countries/germany/emissions>

Germany's energy consumption and power mix in charts. (2024, 4 abril). Clean Energy Wire. <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/germanys-energy-consumption-and-power-mix-charts>

Griffiths, M. (Ed.). (2007). *International relations theory for the twenty-first century: An introduction*. Routledge.

Hannah Ritchie, Pablo Rosado and Max Roser (2020) "Emissions by sector: where do greenhouse gases come from?". *Our World In Data*. <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>

Hansen, K., Mathiesen, B.V., & Skov, I.R. (2019). Full energy system transition towards 100% renewable energy in Germany by 2050. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 102, 1-13

IPCC. (2023, 1 de junio). La acción climática urgente puede garantizar un futuro habitable para todos. [Comunicado de prensa]. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/press/IPCC_AR6_SYR_PressRelease_es.pdf

IPCC. (2019). Resumen para responsables de políticas del Informe Especial sobre el Calentamiento Global de 1.5 °C. Resumen]. Recuperado de: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/SR15_Summary_Volume_spanish.pdf

Kaya, F., Walasek, R., & Kochański, K. (2023). El impacto de los combustibles fósiles, la energía renovable y la energía nuclear en el medio ambiente de Corea del Sur basado en el modelo STIRPAT: enfoques ARDL, FMOLS y CCR. *Energies*, 16(17), 6198. <https://doi.org/10.3390/en16176198>

Kind, C. (2010). *Analysis of the German market for voluntary carbon offsetting*. Summary. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/climate_change_10_2010_kurzfassung_e1_0.pdf

Kreibich, N., & Hermwille, L. (2021). Caught in between: credibility and feasibility of the voluntary carbon market post-2020. *Climate Policy*, 21(7), 939-957. <https://doi.org/10.1080/14693062.2021.1948384>

Liu, M., Zhou, C., Lu, F., & Xiao-Han, H. (2021). Impact of the implementation of carbon emission trading on corporate financial performance: Evidence from listed companies in China. *PloS One*, 16(7), e0253460. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0253460>

L, J. (2024c, enero 4). Carbon Prices and Voluntary Carbon Markets Faced Major Declines in 2023, What's Next for 2024? Carbon Credits. <https://carboncredits.com/carbon-prices-and-voluntary-carbon-markets-faced-major-declines-in-2023-whats-next-for-2024/#:~:text=The%20year%202023%20marks%20a,downturn%20in%20price%20and%20demand.>

Maennel, A., & Kim, H. (2018). Comparison of Greenhouse Gas Reduction Potential through Renewable Energy Transition in South Korea and Germany. *Energies*, 11(1), 206. <https://doi.org/10.3390/en11010206>

McGrath, M. (17 de mayo 2023). "Es la primera vez en la historia que estamos tan cerca": el calentamiento global superará el límite crucial de 1,5 °C para 2027, según los expertos. BBC News Mundo. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-65619872>

Osobajo, O. A., Otitoju, A., Otitoju, M. A., & Oke, A. (2020). The Impact of Energy Consumption and Economic Growth on Carbon Dioxide Emissions. *Sustainability*, 12(19), 7965. <https://doi.org/10.3390/su12197965>

Our corporate carbon footprint. (s. f.). <https://www.basf.com/global/en/who-we-are/sustainability/we-produce-safely-and-efficiently/energy-and-climate-protection/corporate-carbon-footprint.html>

Plasencia, J. (2023, 9 agosto). *EU ETS: ¿Qué es y por qué está cambiando?* Climate Trade. <https://climatetrade.com/es/eu-ets-que-es-y-por-que-esta-cambiando/>

Rashmi, R. R., & Ahuja, R. (2019). *Clean Development Mechanism as Catalyst for Sustainable Development Mechanism Under Article 6.4*. New Delhi: The Energy and Resources Institute. 13 pp. <https://www.teriin.org/sites/default/files/2019-11/clean-development-mechanism.pdf#:~:text=URL%3A%20https%3A%2F%2Fwww.teriin.org%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2F2019>

Ritchie, H., Rosado, P., & Roser, M. (2024, 18 marzo). Which countries have put a price on carbon? Our World In Data. <https://ourworldindata.org/carbon-pricing#article-citation>

Stiftung, B. (s. f.). SGI 2022 | South Korea | Environmental Policies. Bertelsmann Stiftung. https://www.sgi-network.org/2022/South_Korea/Environmental_Policies

S&P Global Commodity Insights. (2023, 28 febrero). Pricing structure in the voluntary carbon market [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=odBA3Pn9H_M

Thallo, & Thallo. (2023, 17 enero). *Fast Forward: Challenges to Scaling the Voluntary Carbon Market*. Thallo. <https://www.thallo.io/fast-forward-report/>

Tollefson, J. (28 de febrero 2022). *Climate change is hitting the planet faster than scientists originally thought*. *Nature*. Nature. <https://doi.org/10.1038/d41586-022-00585-7>

Umweltbundesamt. (2022). Information Paper on the analysis of the German Voluntary Offsetting market 2021. [Documento informativo]. Recuperado de https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/cc_23-2022_information_paper_on_the_analysis_of_the_german_voluntary_offsetting_market_2021.pdf

Valdés, Ruy. (20 de septiembre 2022). *El PM promete alcanzar la neutralidad de carbono*. Yonhap News Agency. <https://sp.yna.co.kr/view/ASP20221020001400883#:~:text=Corea%20del%20Sur%20tambi%C3%A9n%20ayudar%C3%A1,neutralidad%20de%20carbono%20para%202050>

Warnecke, C (2017). Germany's international cooperation on carbon markets: Status and prospects in selected partner countries. Umweltbundesamt. <https://newclimate.org/sites/default/files/2017/11/overview.pdf>

Yang, Z., Yuan, Y., & Zhang, Q. (2022). Carbon Emission Trading Scheme, Carbon Emissions Reduction and Spatial Spillover Effects: Quasi-Experimental Evidence From China. *Frontiers In Environmental Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.824298>

Yeon-woo, L. (23 de agosto 2023). *Financial firms vie for lead in private carbon market*. KoreanTimes.

<https://www.koreatimes.co.kr/www/common/printpreviews.asp?categoryCode=175&newsIdx=355404>

(4 de abril, 2022) *Artículo 6 del Acuerdo de París: 3 aspectos claves del mercado de carbono*. Carbon Neutral +. <https://www.carbonneutralplus.com/articulo-6-del-acuerdo-de-paris-3-aspectos-clave-del-mercado-de-carbono/>

(1 de Agosto, 2023) *Global Carbon Council and Climate Change Center to expand Voluntary Carbon Market in South Korea and MENA*. Global Carbon Council. <https://www.globalcarboncouncil.com/global-carbon-council-and-climate-change-center-to-expand-voluntary-carbon-market-in-south-korea-and-mena/>

ANEXO 1. LISTADO DE ABREVIATURAS

ACR	American Carbon Registry
BMUB	Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza Seguridad Nuclear y Protección del Consumidor Alemán
BMZ	Ministerio Federal de Desarrollo y Cooperación Alemán
BNEF	Bloomberg New Energy Finance Limited
CAR	Climate Action Reserve
CMNUCC	La Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
CO	Dióxido de Carbono
CO ₂ e	CO ₂ equivalente
COP21	Conferencia sobre el Cambio Climático de París
CPLC	Coalición de Liderazgo en Fijación de Precios del Carbono
DACCS	Direct Air Carbon Capture and Storage
ESG	Environmental, Social and Governance
ETS	Emission Trading Systems
EU ETS	Régimen de comercio de derechos de emisión de la Unión Europea
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GS	Gold Standard
GT	Gigatonelada (1 mil millones de toneladas)
I+D	Investigación científica, desarrollo e innovación tecnológica
ICROA	Asociación Internacional de Compensación y Reducción de Carbono
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
MCC	Mercado de Carbono de Cumplimiento
MDL	Mecanismo de Desarrollo Limpio
MVC	Mercado Voluntario de Carbono
NDC	Contribuciones Nacionalmente Determinadas
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
ONG	Organización No gubernamental
PMA	Países Menos Adelantados
PMR	Asociación para la Preparación del Mercado
REDD+	Reducing emissions from deforestation and forest degradation.

SCE	Sistemas De Comercio De Emisiones
TRI	Teorías de Relaciones Internacionales
VCS	Verified Carbon Standard
VVBs	Programas de acreditación y las Entidades de Validación y Verificación (Validation Verification Bodies – which are qualified, third-party auditors)

ANEXO 2. RESULTADOS STATA / GRETEL

```
regress log_co2_pc emission_markets log_gdp_pc pop_growth
```

Source	SS	df	MS	Number of obs	=	60
Model	.314331762	3	.104777254	F(3, 56)	=	6.24
Residual	.939836788	56	.0167828	Prob > F	=	0.0010
				R-squared	=	0.2506
				Adj R-squared	=	0.2105
Total	1.25416855	59	.021257094	Root MSE	=	.12955

log_co2_pc	Coefficient	Std. err.	t	P> t	[95% conf. interval]	
emission_markets	-.1484275	.048489	-3.06	0.003	-.2455626	-.0512924
log_gdp_pc	.2065585	.0515271	4.01	0.000	.1033372	.3097798
pop_growth	.9599537	4.843438	0.20	0.844	-8.742618	10.66253
_cons	.2592277	.5179632	0.50	0.619	-.7783772	1.296833

```
. regress log_co2_pc emission_markets log_gdp_pc
```

Source	SS	df	MS	Number of obs	=	62
Model	.516424963	2	.258212481	F(2, 59)	=	14.39
Residual	1.05887945	59	.017947109	Prob > F	=	0.0000
				R-squared	=	0.3278
				Adj R-squared	=	0.3050
Total	1.57530441	61	.025824663	Root MSE	=	.13397

log_co2_pc	Coefficient	Std. err.	t	P> t	[95% conf. interval]	
emission_markets	-.1760207	.0483618	-3.64	0.001	-.2727924	-.0792489
log_gdp_pc	.2437672	.045473	5.36	0.000	.1527758	.3347585
_cons	-.1032146	.4446583	-0.23	0.817	-.9929739	.7865447

```

. regress log_co2_pc emission_markets log_gdp_pc consumo_total

```

Source	SS	df	MS	Number of obs	=	52
Model	1.10183488	3	.367278292	F(3, 48)	=	151.95
Residual	.116023115	48	.002417148	Prob > F	=	0.0000
				R-squared	=	0.9047
				Adj R-squared	=	0.8988
Total	1.21785799	51	.023879568	Root MSE	=	.04916

log_co2_pc	Coefficient	Std. err.	t	P> t	[95% conf. interval]	
emission_markets	-.0753215	.0221805	-3.40	0.001	-.1199184	-.0307247
log_gdp_pc	.0952261	.0233262	4.08	0.000	.0483256	.1421265
consumo_total	.0001726	.0000138	12.54	0.000	.0001449	.0002003
_cons	.6490201	.1943068	3.34	0.002	.2583401	1.0397

```

Fixed-effects (within) regression
Group variable: id

```

Number of obs	=	50
Number of groups	=	2
R-squared:		
Within	=	0.9627
Between	=	1.0000
Overall	=	0.7550
Obs per group:		
min	=	25
avg	=	25.0
max	=	25
	F(4,44)	= 284.23
corr(u_i, Xb) = -0.2990	Prob > F	= 0.0000

log_co2_pc	Coefficient	Std. err.	t	P> t	[95% conf. interval]	
emission_markets	-.0601032	.0125836	-4.78	0.000	-.0854637	-.0347427
log_gdp_pc	-.02799	.0200496	-1.40	0.170	-.0683973	.0124172
consumo_total	.0002143	9.87e-06	21.72	0.000	.0001944	.0002342
pop_growth	2.060649	1.126927	1.83	0.074	-.2105221	4.33182
_cons	1.700335	.1714509	9.92	0.000	1.354799	2.045872
sigma_u	.0907748					
sigma_e	.02714603					
rho	.91791142	(fraction of variance due to u_i)				