



Los determinantes del mercado de créditos de carbono

Johan Alexander Meneses Castañeda

Trabajo de grado presentado para optar al título de Economista

Asesor

Alexander de Jesús Tobón Arias, Doctor (PhD) en Ciencias Económicas

Profesor Titular del Departamento de Economía

Universidad de Antioquia

Facultad de Ciencias Económicas

Economía

Medellín, Antioquia, Colombia

2023

Cita	(Meneses Castañeda, 2023)
Referencia	Meneses Castañeda, J. A. (2023). <i>Los determinantes del mercado de créditos de carbono</i> [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Centro de Documentación Economía

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes

Decano: Jair Albeiro Osorio Agudelo

Jefe de departamento: Claudia Cristina Medina Palacios

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

A los amores de mi vida, abuela y esposo, por su paciencia, apoyo y amor incondicional.

Agradecimientos

Al profesor Alexander Tobón Arias del Grupo de Macroeconomía Aplicada por su acompañamiento, dedicación y compromiso.

Tabla de contenido

Introducción.....	10
1. Contextualización teórica.....	12
2. Iniciativas para la reducción de los Gases de Efecto Invernadero (GEI).....	16
2.1 Iniciativas compensatorias por la vía del mercado.....	17
2.1.1 Mecanismos por la vía de mercados regulados.....	17
Sistema de Comercio de Emisiones (SCE)	
Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL)	
2.1.2 Mecanismos por la vía de mercados voluntarios.....	19
CORSIA	
Mercado Voluntario de Créditos de Carbono (MVCC)	
2.2 Iniciativas sancionatorias por la vía del Estado: El impuesto al carbono.....	21
3. Caracterización del mercado de carbono.....	25
3.1 Actores del mercado de carbono.....	25
3.2 Demandantes de créditos de carbono.....	31
3.3 Oferentes de créditos de carbono.....	32
3.3.1 Etapas de certificación de un proyecto de mitigación ambiental.....	34
3.3.2 La determinación del precio de un crédito de carbono.....	37
3.3.3 Cálculo del Valor Presente Neto (VPN) en un PDD.....	40
Conclusiones.....	43
Referencias.....	45

Lista de tablas

Tabla 1 Tipos de iniciativas de reducción de GEI implementadas en el mundo al 31 de marzo de 2023	22
Tabla 2 Empresas que desempeñan el rol de desarrolladores de proyectos ambientales para emisión créditos destinados al MVCC	27
Tabla 3 Empresas que desempeñan el rol de validadores y verificadores de proyectos de mitigación ambiental	28
Tabla 4 Empresas que desempeñan el rol de certificadores de créditos de carbono provenientes de proyectos de mitigación ambiental	29
Tabla 5 Empresas que desempeñan el rol de brokers de créditos de carbono	30
Tabla 6 Plataformas de intercambio de créditos de carbono	31

Lista de figuras

Figura 1 Actores del mercado voluntario de créditos de carbono.....	26
Figura 2 Etapas de la formulación, implementación y registro de un proyecto de mitigación ambiental conducente a la emisión de créditos de carbono.....	35

Listado de gráficas

Gráfica 1 Valor en \$USD por tonelada de CO ₂ de un certificado reconocido para compensación en el SCE en 2022 en algunos países, territorios y ciudades del mundo	20
Gráfica 2 Impuesto al Carbono en el mundo por tonelada de CO ₂ emitida en 2022 (Valor en \$USD).....	22
Gráfica 3 Participación de los sectores ambientales emisores de créditos de carbono en el mundo	33

Siglas, acrónimos y abreviaturas

CER	Certificado de Reducción de Emisiones
CORSIA	Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation
CTE	Cupo Transable de Emisión
GEI	Gases de Efecto Invernadero
IFPC	Instrumentos de Fijación de Precio al Carbono
INC	Impuesto Nacional al Carbono
MDL	Mecanismo de Desarrollo Limpio
MVCC	Mercado Voluntario de Créditos de Carbono
OVV	Organismos de Validación y Verificación
PDD	Project Design Document
PSC	Precio Sombra al Carbono
SCE	Sistema de Comercio de Emisiones

Resumen

Este trabajo aborda la gestión de las externalidades ambientales negativas causadas por las emisiones de gases de efecto invernadero, mediante enfoques teóricos como el impuesto pigouviano y la solución de Coase, destacando el mercado de créditos de carbono como un mecanismo clave para compensar emisiones. El propósito, es identificar los determinantes del mercado de créditos de carbono a través de la caracterización de la oferta, la demanda y los precios de estos créditos de carbono. Para tal fin, se enfatiza en los determinantes de la oferta de créditos, discutiendo las etapas de certificación de un proyecto de mitigación ambiental y la importancia del precio sombra del carbono en el cálculo de la rentabilidad de un proyecto ambiental. Se concluye que los mecanismos del mercado de carbono impulsan la innovación y la cooperación global para abordar el cambio climático, además, que la determinación precisa del precio de un crédito de carbono, basado en el cálculo del precio sombra del carbono para internalizar costos sociales de emisiones, es crucial para evaluar la viabilidad financiera de proyectos ambientales que participan en el mercado de carbono.

Palabras clave: Teorema de Coase, impuesto pigouviano, mercado de créditos de carbono, oferta de créditos de carbono, demanda de créditos de carbono, precios sombra del carbono.

Clasificación JEL: D4, D62, E64, Q01, Q57

Abstract

This paper addresses the management the negative environmental externalities due to greenhouse gas emissions, using theoretical approaches such as the Pigouvian tax and the Coase solution, highlighting the carbon credit market as a key mechanism to compensate emissions. The purpose is to identify the determinants of the carbon credit market through the characterization of the supply, demand and prices of these carbon credits. To this end, emphasis is placed on the determinants of the supply of credits, discussing the certification stages of an environmental mitigation project and the importance of the shadow price of carbon in the calculation of the profitability of an environmental project. It is concluded that carbon market mechanisms drive innovation and global cooperation to address climate change, in addition, that the accurate pricing of a carbon credit, based on the calculation of the shadow carbon price to internalize social costs of emissions, is crucial to assess the financial viability of environmental projects participating in the carbon market.

Keywords: Coase's theorem, Pigouvian tax, carbon credit market, supply of carbon credits, demand for carbon credits, shadow carbon prices.

Introducción

En un mundo cada vez más consciente de los problemas del cambio climático, el cumplimiento de la agenda internacional de políticas de mitigación ambiental se ha vuelto más apremiante. Gobiernos, personas, organizaciones y empresas de todo el mundo están trabajando en el desarrollo de políticas ambientales cada vez más innovadoras en términos de su eficiencia.

La Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP26) que tuvo lugar en Glasgow (Reino Unido) en 2021, enfatizó en la necesidad de avanzar en el cumplimiento del objetivo trazado en el Acuerdo de París, ratificando el compromiso de los países firmantes para continuar con los esfuerzos y la financiación requerida para lograr de manera efectiva la reducción de emisiones de GEI.

Sin embargo, fue a partir del Protocolo de Kyoto (1997)¹ donde nació uno de los principios que sustenta la política internacional de reducción de las emisiones de GEI: la compensación por los afectos dañinos de la contaminación atmosférica que han provocado el calentamiento global. La tesis que con frecuencia se escucha decir es “el que contamina paga”, es decir que el que contamina compensa. En esta perspectiva, el mercado de carbono ha ganado terreno en los últimos años ya que se trata de un conglomerado de iniciativas que promueven la compensación por parte de las personas, empresas, organizaciones e incluso gobiernos.

El mercado de carbono es interesante porque busca aprovechar los incentivos automáticos que crea un mercado para dirigir la inversión hacia proyectos de reducción de GEI, especialmente en sectores económicos que inciden decisivamente en la mitigación del cambio climático, como por ejemplo el sector de energías renovables. Como veremos, un crédito de carbono es un activo financiero cuyo precio monetario expresa el compromiso de un proyecto ambiental en la captura una cantidad de dióxido de carbono –CO₂– que ha sido arrojado a la atmósfera. En su calidad de activo, el crédito de carbono se ofrece y se demanda creando un mercado que materializa una acción efectiva de lucha contra el cambio climático. Por lo tanto, el estudio de este mercado es interesante

¹ Es un acuerdo internacional que busca reducir las emisiones de GEI para combatir el cambio climático, el cual estableció objetivos vinculantes para los países industrializados con el fin de limitar y reducir sus emisiones.

porque permite comprender cómo los incentivos del mercado se pueden utilizar para aportar al crecimiento económico global sostenible.

El objetivo de este trabajo de grado es identificar los determinantes del mercado de créditos de carbono, es decir que se pretende explicar las características de la oferta y de la demanda de créditos de carbono, con el fin entender cómo los precios a los cuales se venden los créditos de carbono aseguran, de un lado, la rentabilidad y sostenibilidad de los proyectos ambientales y, por otro lado, se logran la compensación deseada de las afectaciones al cambio climático en términos de reducciones de GEI.

El enfoque metodológico adoptado en este trabajo de grado combina elementos cualitativos y cuantitativos. Por un lado, se emplea una metodología cualitativa basada en una revisión de referentes teóricos y conceptuales, enfocados a la compensación de emisiones de GEI y que son aplicados al mercado de carbono, tales como el impuesto pigouviano y el teorema de Coase. Por otro lado, se integra una perspectiva cuantitativa al utilizar algunos datos proporcionados por el Banco Mundial, que permiten identificar las experiencias en torno los mercados de créditos de carbono para algunos países, ciudades y territorios.

Este documento se compone de tres capítulos. En el primero, se realizará una contextualización teórica que permitirá entender conceptualmente cómo desde las ciencias económicas y sus instrumentos, se contribuye en la internalización de las externalidades enfocado al mercado de carbono. En el segundo, se presentará las iniciativas y los mecanismos existentes para la reducción de GEI de la agenda mundial para la lucha contra el cambio climático y, finalmente, en el tercer capítulo, se expondrá la caracterización del mercado de carbono con el fin de comprender el funcionamiento en términos de la oferta y la demanda de créditos de carbono, así como las etapas de los proyectos de mitigación ambiental para la generación de créditos de carbono y el método del precio sombra al carbono.

1. Contextualización teórica

Los científicos están convencidos que la aceleración de la producción y el consumo de bienes y servicios, después de la primera revolución industrial, han provocado paulatinamente un cambio climático del planeta. Como se sabe, la producción y el consumo generan residuos y desechos sólidos, líquidos y gaseosos que terminan por contaminar el medio ambiente, sin que nadie asuma los daños o las externalidades negativas que causan. La razón es que el medio ambiente es un “bien de interés colectivo” o “bien público”, es decir, que no es propiedad privada de nadie, por consiguiente, el medio ambiente es un “bien” que no tiene precio.

Desde los años 90, el cambio climático ha surgido como uno de los desafíos políticos, económicos, sociales y culturales más importantes para la humanidad. En este contexto, la ciencia económica se presenta como un campo de estudio para abordar la manera en que estas externalidades se puede internalizar, es decir, reducirlas de tal manera que se pueda mitigar los efectos nocivos no solo sobre el clima, sino también sobre los ecosistemas.

Uno de los aspectos centrales es que el cambio climático del planeta se debe, en esencia, a la emisión excesiva de gases de efecto invernadero -GEI- a la atmósfera, como consecuencia de distintas actividades de producción y consumo. Particularmente, se ha demostrado que el gas más nocivo para la atmósfera es el dióxido de carbono -CO₂-. En esta perspectiva, los economistas han identificado una base conceptual que apunta al diseño de políticas económicas que busca internalizar las externalidades negativas, por medio de la gestión económica de las emisiones de GEI.

Las externalidades son consecuencias inesperadas de las decisiones de producción y consumo. Estas pueden ser positivas si generan beneficios inesperados o negativas si generan costos inesperados. Lo importante de las externalidades es que no se corrigen automáticamente porque no están reflejadas en el mecanismo de precios. Particularmente, la característica de las externalidades negativas es que alguien las padece sin que sea compensado por daños causados y así estos daños tienden a aumentar. En ese sentido, la permanencia de las externalidades ambientales negativas resalta la necesidad que tienen los economistas de proponer mecanismos económicos que las

corrijan o internalicen, ya sea por medio de la intervención activa del Estado a través de impuestos, como los impuestos pigouvianos, o por medio de la puesta en marcha de mecanismos de precios de mercado una vez se hayan asignado derechos de propiedad sobre los recursos ambientales, es decir, la solución de Coase. Sobre esta base conceptual, Tobón-Orozco y Vasco-Correa (2019) presentan tres mecanismos que son utilizados para la internalización de las externalidades negativas: 1) Normas de comando y control, 2) Instrumentos económicos de impuestos y tasas y 3) Iniciativas privadas para disminuir las externalidades ambientales.

En primer lugar, las normas de comando y control se refieren a la definición de topes máximos de emisiones de GEI fijados por el Estado, ya sea en porcentajes o en cantidades fijas. Estos topes se asignan a través de un sistema de subastas públicas o de venta de permisos para contaminar, como lo es el Sistema de Comercio de Emisiones (SCE o ETS), explicado en el capítulo 2.

En segundo lugar, están los instrumentos económicos que le apuntan al reducir el costo social de las externalidades. Por un lado, el impuesto propuesto por Pigou (1920)² que incentiva la reducción de las emisiones de CO₂ al reflejar los costos sociales asociados, ya que se busca inducir a los actores a internalizar las externalidades y reconsiderar sus elecciones en función de los verdaderos costos sociales como un mecanismo eficaz para combatir el cambio climático. Por otro lado, las tasas ambientales que son establecidas a fin de cumplir metas ambientales y son fijadas por encima o por debajo del impuesto pigouviano, lo cual ocasiona que su aplicación sea más costosa en términos políticos debido a los errores que puedan darse al momento de realizar los cálculos y predicciones correspondientes.

En síntesis, el impuesto pigouviano se traduce en la fijación de un precio sobre las emisiones de GEI, convirtiéndose en un catalizador financiero para la reducción de la huella de carbono que dejan las decisiones económicas de producción y consumo. La aplicación del principio de "*quien contamina paga*" se materializa a través del precio del carbono, toda vez que se ha evidenciado que la implementación de tarifas altera de manera significativa el comportamiento de otros contaminadores, además de influir en las emisiones de GEI (Blanchard *et al.*, 2023).

² Es un enfoque microeconómico que propone un tributo directo sobre las externalidades ambientales negativas, el cual debe ser igual al valor del daño causado para obtener un nivel socialmente eficiente.

Sin embargo, el impuesto pigouviano no está exento de limitaciones debido a que la presencia de información asimétrica y la complejidad en la evaluación precisa de las externalidades pueden debilitar su eficacia (Tobón-Orozco & Vasco-Correa, 2019). La información asimétrica en este contexto se traduce en desigualdades de conocimiento entre el regulador y las empresas, presentando desafíos como la imprecisión en la evaluación de los costos marginales de contaminación. En otras palabras, el regulador se encuentra con obstáculos para determinar con precisión los costos de las externalidades negativas de las emisiones, ya que las empresas disponen de información detallada sobre sus procesos internos, lo que propicia comportamientos estratégicos y la existencia de información privilegiada en tecnologías de mitigación. Estas dificultades inciden en la verificación de emisiones, comprometiendo la implementación y eficacia del impuesto pigouviano.

Ante estas limitaciones, emerge el Teorema de Coase (1960)³ como una alternativa atractiva de negociación directa entre partes interesadas, donde la asignación de los derechos de propiedad de los bienes de interés colectivo (los bienes ambientales) juega un papel central. En consecuencia, la solución de Coase, concebida como una respuesta a las limitaciones del impuesto pigouviano, ofrece un enfoque alternativo y flexible para abordar las externalidades ambientales, incluyendo las emisiones de GEI.

En tercer lugar, las iniciativas privadas para la disminución de externalidades ambientales como la Responsabilidad Social Corporativa (RSC), implica que las empresas asuman *voluntariamente* acciones más allá de sus obligaciones legales básicas con el fin de mitigar los impactos negativos que generan en el medio ambiente, contribuyendo así a la reducción de externalidades negativas asociadas con sus operaciones. Por lo tanto, la RSC se convierte en una de las principales motivaciones de las empresas para la participación en el mercado de carbono, a través de la adquisición voluntaria de créditos de carbono (Sullivan *et al.*, 2020), detallada en el capítulo 3.

³ Establece que en condiciones de derechos de propiedad claros y costos de transacción nulos, la negociación entre las partes conducirá a una asignación óptima en el mercado.

En efecto, el mercado de carbono, el cual fue originado a partir del Protocolo de Kyoto y donde se establecieron límites de emisión de GEI para cada país o industria contaminante, es una de las aplicaciones más destacadas de la solución de Coase (Tobón-Orozco y Vasco-Correa, 2019). Esto, considerando que los roles de los actores involucrados en el mercado, así como los derechos de propiedad de los vendedores de créditos de carbono están bien definidos, toda vez que los esfuerzos de reducción de GEI, realizados a través de los proyectos de mitigación ambiental, son adicionales y cuantificables, así como se explica en el capítulo 3.

Sin embargo, la implementación de estos proyectos de mitigación ambiental puede enfrentarse a lo que en la literatura se refiere como “*limitaciones al carbono*”, las cuales son definidas como aquellas restricciones vinculadas a las emisiones de CO₂ que pueden afectar las tácticas comerciales, las elecciones operativas y la viabilidad financiera de los proyectos de mitigación ambiental (Zhou & Wen, 2019). En ese sentido, la determinación del precio al carbono como producto de la reducción o compensación realizada en los proyectos de mitigación ambiental, considerando estas limitaciones, se basa en la evaluación de costo-beneficio, desarrollado en el capítulo 3.

En síntesis, el mercado de carbono es considerado como una estrategia que permite a las empresas, países y territorios, demostrar la reducción y/o compensación de emisiones de GEI en sus diferentes actividades económicas mediante la adquisición de créditos de carbono.

2. Iniciativas para la reducción de los Gases de Efecto Invernadero (GEI)

La agenda política mundial en torno a la mitigación del cambio climático no sólo es esencial desde una perspectiva ambiental sino también desde una visión de política económica. La transición hacia una economía baja en consumo de carbono y basada en el uso de energías renovables crea nuevos mercados y empleos, fomenta la innovación y la competitividad, y promueve la eficiencia en el uso de recursos naturales. En ese sentido, invertir en tecnologías verdes y proyectos de infraestructura sostenible no sólo ayuda a reducir las emisiones de GEI, sino que también promueve la resiliencia económica frente a los impactos climáticos.

En la agenda internacional por la lucha contra el cambio climático, se han adoptado dos tipos de iniciativas clave para la reducción de emisiones de GEI. Por un lado, las iniciativas compensatorias, las cuales buscan compensar las afectaciones climáticas haciendo un uso de los incentivos ofrecidos por el mercado de créditos de carbono. Un crédito es un certificado que expresa reducciones verificadas o eliminaciones de emisiones de GEI emitido sobre la base de proyectos de mitigación ambiental, tales como proyectos de energías renovables, reforestación, eficiencia energética, entre otros. En consecuencia, la oferta y demanda de créditos materializa, en términos económicos, la compensación climática por parte de empresas e incluso países.

Por otro lado, están las iniciativas sancionatorias las cuales son medidas implementadas por las autoridades o entidades reguladoras de un país o territorio, con el propósito de asegurar que compromisos adquiridos en los distintos acuerdos internacionales para la lucha contra el cambio climático se cumplan de manera efectiva. Las iniciativas sancionatorias suelen involucrar impuestos, sanciones o multas a quienes incumplan con ciertas normativas o prácticas orientadas a la reducción de GEI. Veamos en detalle.

2.1 Iniciativas compensatorias por la vía del mercado

Como se mencionó arriba, las iniciativas compensatorias utilizan los incentivos económicos que surgen del mercado. Se pueden distinguir dos grupos: el mercado regulado o de cumplimiento, y el mercado voluntario. Por un lado, el mercado regulado creado con el fin de dar cumplimiento a metas obligatorias donde participan empresas que tienen la responsabilidad de alcanzar metas específicas de reducción de emisiones de GEI, y lo hacen a través de la adquisición de créditos de carbono generados por proyectos de mitigación, certificados y verificados según estándares reconocidos. Por otro lado, el mercado voluntario no implica obligaciones formales lo que permite a que las empresas compensen sus emisiones de manera voluntaria.

Tanto en el mercado regulado como en el voluntario, la compensación se efectúa mediante la adquisición créditos de carbono generados por proyectos de mitigación, certificados y verificados según estándares reconocidos, sin embargo, los créditos ofrecidos en el mercado regulado son de obligatoria compra por parte de las empresas, mientras que los créditos ofrecidos en el mercado voluntario son de compra discrecional por parte de las empresas.

2.1.1 Mecanismos por la vía de mercados regulados

Las iniciativas compensatorias por la vía mercado regulado, se establecieron por primera vez en los Protocolos de Kyoto de 2005. Estos protocolos son un tratado internacional que tiene como objetivo reducir las emisiones de GEI para combatir el cambio climático y estableció metas de reducción de emisiones principalmente para los países industrializados. Más tarde, el Acuerdo de París de 2015 llevó estas iniciativas compensatorias un paso más allá, al enfocarse en los pilares clave de mitigación y adaptación al cambio climático. Este acuerdo estableció como objetivo primordial limitar el calentamiento global por debajo de los 2°C (preferiblemente a 1.5°C) y desarrolló un marco de gestión transparente y de rendición de cuentas, con el fin de garantizar el cumplimiento de los compromisos y la presentación clara y verificable de las acciones climáticas de cada país. Además, reconoció la relevancia del financiamiento climático público para apoyar a las naciones en desarrollo en sus esfuerzos de mitigación y adaptación al cambio climático.

El mercado regulado está vinculado a compromisos obligatorios, ya sea en el marco de regulaciones internacionales o nacionales. Existen esencialmente dos mecanismos:

Sistema de Comercio de Emisiones (SCE) o en inglés *Emissions Trading System* (ETS) y el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), explicados a continuación.

Sistema de Comercio de Emisiones (SCE o ETS). Este mecanismo opera bajo el principio “*cap and trade*”, traducido como “*tope y comercio*”. Se trata de un mecanismo en el que el gobierno de un país establece un límite o tope las emisiones de GEI, esto es, se fija la cantidad máxima de toneladas de dióxido de carbono -CO₂- que pueden ser emitidas en el país. Posteriormente, el mismo gobierno crea derechos de emisión de CO₂ o Cupos Transables de Emisión (CTE).

Muchos países encuentran en este mecanismo de SCE una garantía para la reducción efectiva de emisiones de GEI y, por consiguiente, es considerado como un mecanismo eficiente para cumplir con las metas establecidas en los acuerdos internacionales. Además, a través de su implementación se promueve la innovación, el desarrollo de nuevas tecnologías y una transición hacia economías más sostenibles y bajas en carbono.

Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL). Consiste en un sistema que permite a los países industrializados la acreditación de reducciones de GEI en diversos sectores como la industria, energía, forestal, residuos y transporte a nivel nacional. En general, los gobiernos promueven la puesta en marcha de proyectos productivos ambientales para reducir las emisiones de GEI en países en vía de desarrollo. A partir de los proyectos ambientales se emiten los Certificados de Reducción de Emisiones (CER), es decir, un derecho que expresa la cantidad de CO₂ que se ha dejado de expulsar a la atmósfera. De esta manera, los CER son utilizados por los países industrializados para demostrar el cumplimiento de sus objetivos de reducción de GEI, al mismo tiempo que ayudan a los países en desarrollo a lograr un desarrollo sostenible.

2.1.2 Mecanismos por la vía de mercados voluntarios

Los mecanismos compensatorios por la vía de los mercados voluntarios son esencialmente dos: el CORSIA (*Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*) y el Mercado Voluntario de Créditos de Carbono (MVCC).

CORSIA. Es una medida global que utiliza el mercado como enfoque para reducir las emisiones de la aviación internacional. A diferencia de las iniciativas regulatorias nacionales o regionales dispersas, el CORSIA proporciona una forma armonizada de mitigar las emisiones en el sector de la aviación y su objetivo consiste en minimizar la distorsión del mercado y respetar las circunstancias y capacidades de los Estados miembros de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI).

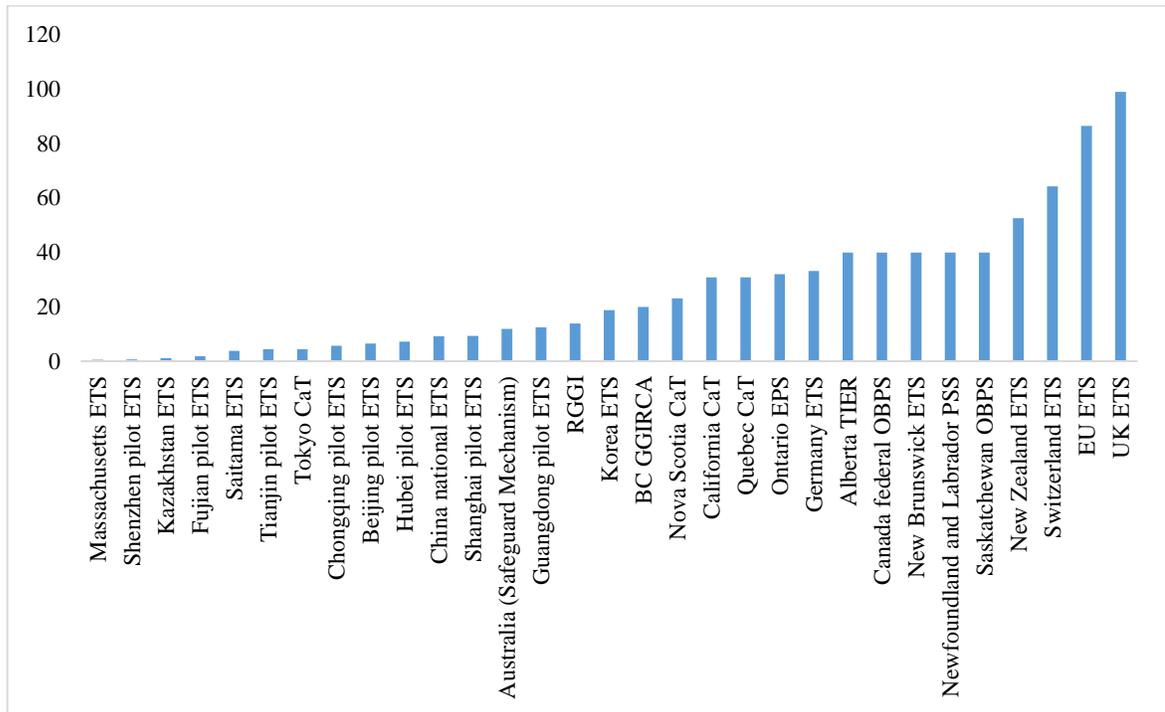
El CORSIA se complementa con otras iniciativas al compensar las emisiones de CO₂ que no pueden reducirse mediante mejoras tecnológicas, operativas o el uso de combustibles sostenibles, utilizando créditos de carbono adquiridos a través del mercado de carbono.

Mercado Voluntario de Créditos de Carbono (MVCC). Es un mecanismo que busca internalizar el costo social y ambiental que genera la emisión de GEI, y que funciona mediante la compra y venta de “unidades de carbono”, entendiendo esta unidad como un crédito o bono de carbono, los cuales son emitidos a partir de proyectos ambientales de mitigación climática puestos en marcha por algunas empresas inversionistas. Bajo ciertas condiciones, cada proyecto ambiental permita la emisión de un cierto número de créditos que expresa la cantidad de CO₂ que no se arrojado a la atmósfera y que luego son luego vendidos a precio monetario a las empresas que desean compensar voluntariamente sus afectaciones al cambio climático.

La materialización de los compromisos de los países, territorios y ciudades en materia de mitigación del cambio climático es bastante desigual. En la gráfica 1 se muestra el valor en \$USD por tonelada de CO₂ de un certificado reconocido o derecho para compensación en el SCE o ETS en 2022 para algunos países y ciudades a nivel mundial. Estos certificados comprenden los Cupos Transables de Emisión (CTE) emitido en el propio mecanismo SCE, pero también los CER

emitidos en el mecanismo MDL y los créditos de carbono emitidos en el MVCC. La razón es que estos dos últimos tipos de certificados sirven para compensación dentro del mecanismo SCE.

Gráfica 1. Valor en \$USD por tonelada de CO₂ de un certificado reconocido para compensación en el SCE en 2022 en algunos países, territorios y ciudades del mundo



Fuente. Elaboración propia con base en los datos del Banco Mundial.

Se puede ver que los certificados emitidos en el SCE o ETS de Massachussets tienen un valor de \$USD 0.5, siendo el más bajo en el mercado, mientras que los certificados de Reino Unido (UK ETS) registran un valor de \$USD 98.99, siendo el mayor en certificados existentes. Además, se evidencia que los certificados emitidos en el mecanismo SCE de Asia y Australia, tienen un bajo valor, ya que están por debajo de los \$USD 13, en comparación con países como Canadá, Alemania, Nueva Zelanda, Suiza, Estados Unidos y Reino Unido, donde el valor mínimo de los certificados se encuentra alrededor de los \$30USD.

2.2 Iniciativas sancionatorias por la vía del Estado: El impuesto al carbono

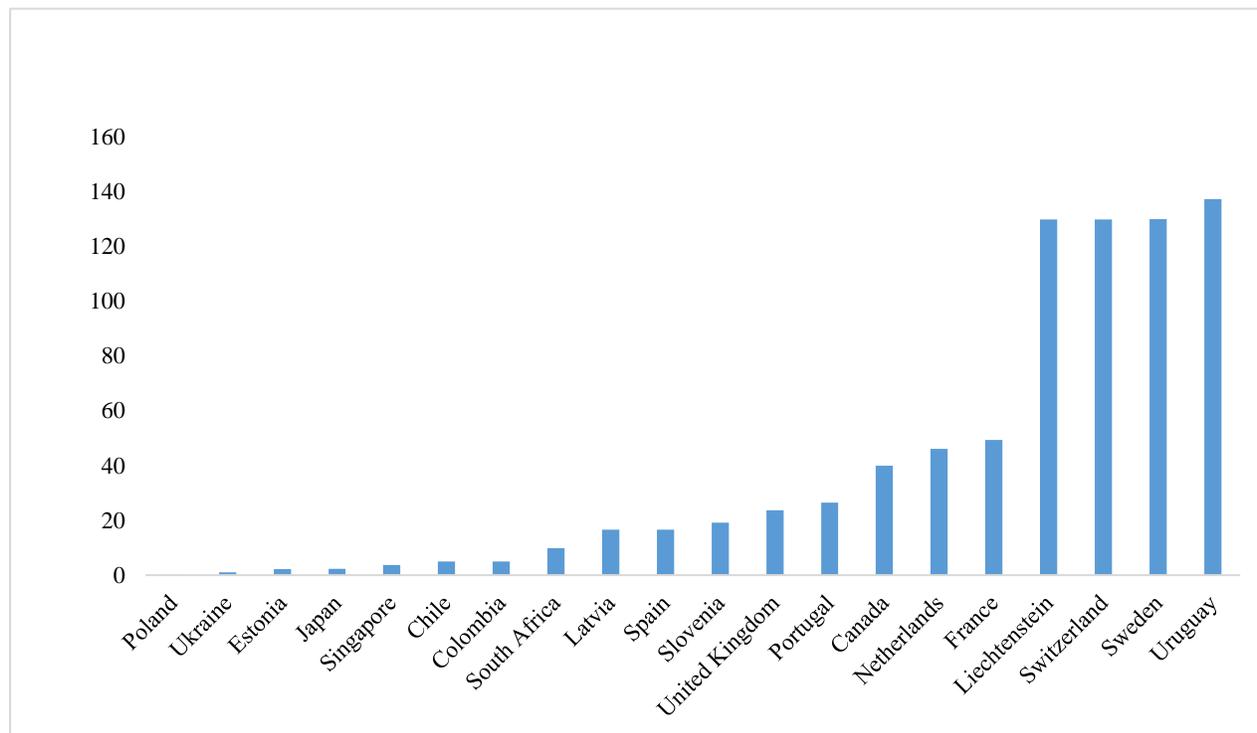
El impuesto al carbono es una iniciativa sancionatoria de tipo fiscal y económica dispuesta por los gobiernos, por medio de la cual se cobra un valor monetario directo a las empresas sobre las cantidades (en toneladas) de CO₂ emitidas a la atmósfera. En ese sentido, el impuesto se convierte en un castigo financiero que incita a los contaminadores a reducir sus emisiones de GEI, toda vez que al gravar las emisiones de GEI, el impuesto al carbono aumenta el costo para las empresas de seguir utilizando combustibles fósiles y otras prácticas contaminantes.

Como resultado, las empresas se ven motivadas a buscar alternativas más limpias y sostenibles, lo que promueve una transición hacia procesos productivos más respetuosos con el medio ambiente. Con frecuencia, los fondos financieros que reúnen los gobiernos por este impuesto son utilizados en reinversión para la implementación de tecnologías más limpias o para la financiación de proyectos ambientales que ayuden al cumplimiento de los objetivos de mitigación climática.

Es importante destacar que las políticas de impuesto al carbono pueden ser una herramienta específica dentro de un conjunto más amplio de medidas sancionatorias. En ese sentido, los gobiernos evalúan las circunstancias y prioridades nacionales para determinar el nivel de impuesto al carbono más adecuado en función de sus objetivos de reducción de emisiones y desarrollo sostenible.

Siguiendo los datos del Banco Mundial (2023), en la gráfica 2 se observa que entre los países que han aplicado un impuesto al carbono, Uruguay es el país que cobra el mayor valor por este concepto (\$USD 137), seguido de países como Suiza, Suecia y Liechtenstein, cuyo valor oscila en \$USD 129. En contraste, países como Polonia, Ucrania, Estonia, Japón, Singapur, Chile, Colombia y Sudáfrica, tienen impuestos más bajos, esto es, que las empresas ubicadas en estos países sólo pagan entre \$USD 1 y \$USD 10 por tonelada de CO₂ emitida. Finalmente, países como España, Eslovenia, Reino Unido, Portugal y Canadá presentan un valor del impuesto intermedio, ya que oscila entre los \$USD 15 y los \$USD 50.

Gráfica 2. Impuesto al Carbono en el mundo por tonelada de CO₂ emitida en 2022 (Valor en \$USD)



Fuente. Elaboración propia con datos del Banco Mundial.

En la tabla 1 se ofrece un panorama del uso de los mecanismos compensatorios y sancionatorios en el mundo. Se presentan 65 países, ciudades y regiones que se han sumado al mecanismo SCE o ETS y/o al impuesto al carbono.

Tabla 1. Tipos de iniciativas de reducción de GEI implementadas en el mundo al 31 de marzo de 2023

JURISDICCIÓN (NACIONALES/ SUBNACIONALES/ REGIONALES)	NOMBRE DE LA INICIATIVA DE REDUCCIÓN DE GEI	TIPO DE INICIATIVA	
		Sistema Comercio de Emisiones o ETS (compensatorio)	Impuesto al Carbono (sancionatorio)
1 Alberta	Alberta	X	
2 Argentina	Argentina carbon tax		X
3 Austria	Austria ETS	X	
4 British Columbia	BC GGIRCA	X	
	BC carbon tax		X
5 Beijing	Beijing pilot ETS	X	

6	California	California CaT	X	
7	Canada	<u>Canada federal OBPS</u>	X	
		Canada federal fuel charge		X
8	Chile	Chile carbon tax		X
9	China	China national ETS	X	
10	Chongqing	Chongqing pilot ETS	X	
11	Colombia	Colombia carbon tax		X
12	Denmark	Denmark carbon tax		X
13	Durango	Durango carbon tax		X
14	EU, Norway, Iceland, Liechtenstein	EU ETS	X	
15	Estonia	Estonia carbon tax		X
16	Finland	Finland carbon tax		X
17	France	France carbon tax		X
18	Fujian	Fujian pilot ETS	X	
19	Germany	Germany ETS	X	
20	Guangdong (except Shenzhen)	Guangdong pilot ETS	X	
21	Hubei	Hubei pilot ETS	X	
22	Iceland	Iceland carbon tax		X
23	Indonesia	Indonesia ETS	X	
24	Ireland	Ireland carbon tax		X
25	Japan	Japan carbon tax		X
26	Kazakhstan	Kazakhstan ETS	X	
27	Korea, Republic of	Korea ETS	X	
28	Latvia	Latvia carbon tax		X
29	Liechtenstein	Liechtenstein carbon tax		X
30	Luxembourg	Luxembourg carbon tax		X
31	Mexico	<u>Mexico carbon tax</u>		X
		Mexico pilot ETS	X	
32	Montenegro	Montenegro ETS	X	
33	Netherlands	Netherlands carbon tax		X
34	New Brunswick	<u>New Brunswick ETS</u>	X	
		New Brunswick carbon tax		X
35	New Zealand	New Zealand ETS	X	
36	Newfoundland and Labrador	<u>Newfoundland and Labrador PSS</u>	X	
		Newfoundland and Labrador carbon tax		X
37	Northwest Territories	Northwest Territories carbon tax		X
38	Norway	Norway carbon tax		X
39	Nova Scotia	Nova Scotia CaT	X	
40	Ontario	Ontario EPS	X	
41	Oregon	Oregon ETS	X	
42	Poland	Poland carbon tax		X
43	Portugal	Portugal carbon tax		X

44	Prince Edward Island	Prince Edward Island carbon tax		X
45	Quebec	Quebec CaT	X	
46	Queretaro	Queretaro carbon tax		X
47	* RGGI	RGGI (Regional Greenhouse Gas Initiative)	X	
		Massachusetts ETS	X	
48	Saitama	Saitama ETS	X	
49	Saskatchewan	Saskatchewan OBPS	X	
50	Shanghai	Shanghai pilot ETS	X	
51	Shenzhen	Shenzhen pilot ETS	X	
52	Singapore	Singapore carbon tax		X
53	South Africa	South Africa carbon tax		X
54	Spain	Spain carbon tax		X
55	State of Mexico	State of Mexico carbon tax		X
56	Sweden	Sweden carbon tax		X
57	Switzerland	Switzerland ETS	X	
		Switzerland carbon tax		X
58	Tianjin	Tianjin pilot ETS	X	
59	Tokyo	Tokyo CaT	X	
60	United Kingdom	UK Carbon Price Support		X
		UK ETS	X	
61	Ukraine	Ukraine carbon tax		X
62	Uruguay	Uruguay CO2 tax		X
63	Washington	Washington CCA	X	
64	Yucatan	Yucatan carbon tax		X
65	Zacatecas	Zacatecas carbon tax		X
TOTAL			36	37

* Connecticut, Delaware, Maine, Maryland, Massachusetts, New Hampshire, New Jersey, New York, Pennsylvania, Rhode Island, Vermont y Virginia.

Fuente. Elaboración propia con datos del Banco Mundial.

En conclusión, en este capítulo se han abordado las iniciativas compensatorias, así como la iniciativa sancionatoria basadas en el impuesto al carbono. Se trata de iniciativas que buscan la reducción de emisiones de GEI y, en consecuencia, promover prácticas ambientales sostenibles. Ahora, en el siguiente capítulo, el énfasis estará en las características esenciales del mercado de carbono, analizando su funcionamiento, actores involucrados y su relevancia en el panorama global de la mitigación del cambio climático.

3. Caracterización del mercado de carbono

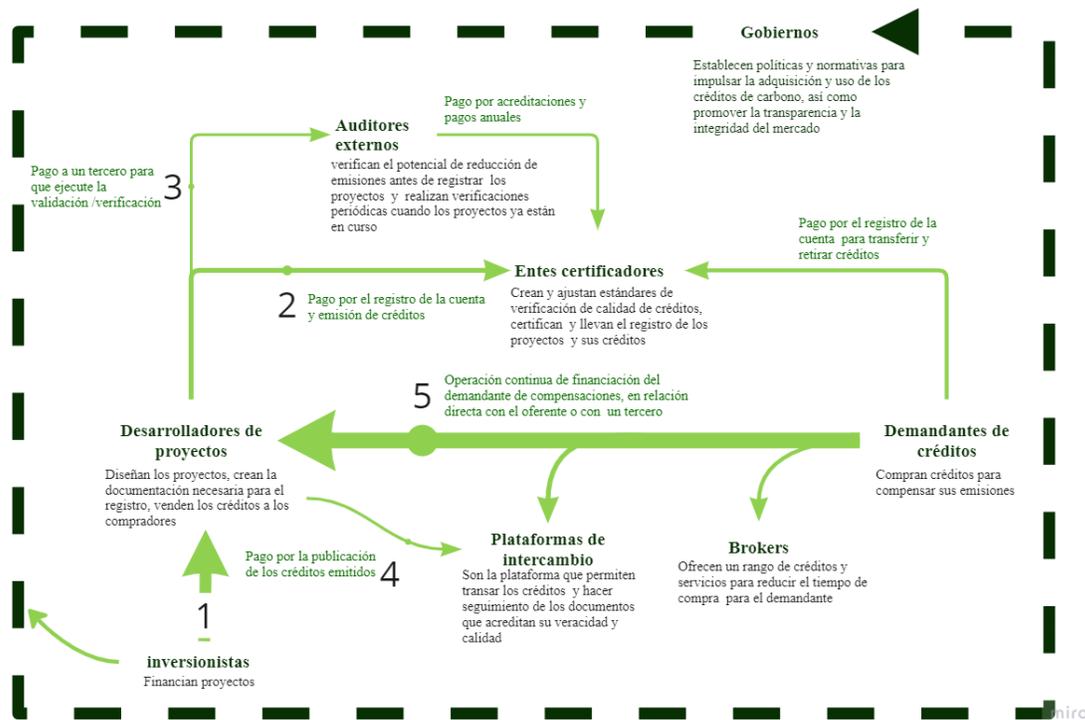
Como se mencionó anteriormente, el mercado de carbono permite a las empresas compensar sus emisiones de GEI por medio de la compra de créditos de carbono. Para comprender su funcionamiento se detallarán los actores clave que intervienen en este mercado, incluyendo las organizaciones, empresas y entidades gubernamentales que participan tanto como oferentes y como demandantes de créditos de carbono. Además, se describirá el proceso para el diseño y desarrollo de proyectos de mitigación ambiental, a partir de los cuales se generan estos créditos de carbono. Se enfatizará en la concepción financiera de los proyectos hasta la certificación de los créditos, pasando por los determinantes de la demanda y, por supuesto, los precios.

3.1 Actores del Mercado de Carbono

Los actores del mercado de carbono se componen de todas las empresas y organizaciones que participan de manera directa e indirecta en el funcionamiento de este mercado. Como veremos a continuación, existe una interdependencia entre todos los actores, haciendo visible la significativa complejidad del mercado de carbono.

En la figura 1 se muestran los ocho actores que intervienen en el mercado de carbono y la interacción entre estos.

Figura 1. Actores del mercado voluntario de créditos de carbono



Fuente. Adaptado de Paía (2021).

Inversionista o dueño del proyecto ambiental. Puede ser una persona natural o jurídica que tienen el derecho legal para financiar proyectos de mitigación ambiental. Estos inversionistas proveen el capital y los medios tecnológicos, de infraestructura o tierras de origen legal.

Desarrolladores de proyectos. Son empresas u organizaciones privadas que ofrecen servicios orientados al diseño y ejecución de proyectos de mitigación de GEI. El proyecto tiene en cuenta la valoración financiera de los aspectos sociales, ambientales y económicos, como se verá más adelante. Para tal fin, los desarrolladores elaboran el *Project Design Document*, conocido por sus siglas en inglés PDD, el cual es también necesario para realizar el registro ante los entes de certificación de los créditos que se emitirán. Los desarrolladores de proyectos acompañan todo el proceso de emisión de los créditos de carbono, así como la transacción comercial entre los oferentes y demandantes. En este procedimiento, los desarrolladores obtienen una ganancia, la cual queda explícita en el acuerdo que se haya pactado con los inversionistas, como asesoría o como porcentaje de acuerdo con la cantidad de créditos que sean transados o vendidos.

En la tabla 2, el lector encontrará algunas empresas que se desempeñan como desarrolladoras de proyectos ambientales para Colombia y a nivel internacional.

Tabla 2. *Empresas que desempeñan el rol de desarrolladores de proyectos ambientales para emisión créditos destinados al mercado de carbono.*

Empresa	Alcance	
	Colombia	Internacional
South pole	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Forliance	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Climate Neutral Group	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
EcoAct	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Carbon Expert Rumania	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
TerraPass	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3 Degrees	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Enking International	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
PathZero	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Native Energy	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Gestión Ambiental Estraetegica	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Climate Impact Partners	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
CO2Cero	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Biofix	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Biocarbon Partners	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Aster Global Environmental Solutions, Inc.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Fuente. Elaboración propia.

Audidores externos. Pueden ser personas naturales o jurídicas que cuentan con la formación y certificación de las metodologías requeridas para llevar a cabo la auditoría de la reducción o captura del CO₂ que producirá un proyecto ambiental según el PDD. En general, esta auditoría la realizan un Organismo de Validación y Verificación, en adelante OVV. En la tabla 3 se presentan algunas empresas que se desempeñan como OVV, para Colombia y a nivel internacional.

Tabla 3. *Empresas que desempeñan el rol de validadores y verificadores de proyectos de mitigación ambiental*

Empresa	Alcance	
	Colombia	Internacional
4K Earth Science Private Limited	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
AENOR International SAU	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Aster Global Environmental Solutions, Inc.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Carbon Check (India) Private Ltd.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
China Classification Society Certification Co. Ltd. (CCSC)	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Control Union Certifications Germany GmbH	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
INCONTEC	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
CTI Certification CO., LTD.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Servicios de certificación de KBS Pvt. Ltd.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
SCS Global Services	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
S&A Carbon, LLC	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
TÜV Nord Cert GmbH	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Bureau Veritas	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Fuente. Elaboración propia.

Las metodologías que sigue una OVV incluyen la identificación del tipo de proyecto ambiental que se ejecutará (energías renovables, eficiencia energética, uso de biomasa, entre otros tipos), con el fin de establecer una línea base que permita comparar la eficiencia del proyecto diseñado respecto a la reducción efectiva de cantidades de emisiones de GEI, usualmente mediante el uso de un análisis de ciclo de vida. Muchos de los elementos considerados en este proceso están estandarizados por las normativas internacionales muy rigurosas, como es el caso de la normatividad estadounidense y la europea, las cuales con frecuencia no contienen características propias de América Latina y el Caribe.

Una vez que los desarrolladores obtengan el certificado por parte del OVV con la verificación de las cantidades de toneladas de CO₂ que pretenden ser mitigadas, ese mismo organismo verifica que

las reducciones de GEI reportadas sean reales, para luego realizar un reporte que será presentado a los entes certificadores.

Entes certificadores. Son organizaciones que se encargan de vigilar el cumplimiento de las metodologías implementadas por una OVV para garantizar que la captura de CO₂ reportada por desarrolladores de proyectos sea válida y no tenga doble contabilidad. Estos entes son quienes finalmente autorizan la emisión u oferta de créditos de carbono. Como funciones principales de los entes certificadores se pueden mencionar: (1). Diseñar las metodologías para que los OVV pueda llevar a cabo la auditoría de los proyectos de mitigación ambiental, (2). Certificar la cantidad de CO₂ que pretende ser mitigado, es decir, la emisión de los créditos de carbono que serán transados en el mercado de carbono, (3). Llevar el registro público de los créditos transados en el mercado, por medio de un código de trazabilidad que le permita al dueño del certificado decidir bajo cual plataforma de intercambio desea transar o vender su crédito de carbono y (4). Adaptar las legislaciones propias de cada país a las metodologías que se usan en el diseño de los proyectos de mitigación ambiental.

En la tabla 4 se presentan algunos entes certificadores para Colombia y a nivel internacional.

Tabla 4. *Empresas que desempeñan el rol de certificadores de créditos de carbono provenientes de proyectos de mitigación ambiental*

Empresas	Alcance	
	Colombia	Internacional
International Organization for Standars	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Verified Carbon Standard	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Gold Standard VERs	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
CCB	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Green-e	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Puro Standart	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
CERCARBONO	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
American Carbon Registry	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
INCONTEC	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Fuente. Elaboración propia.

Demandantes o compradores de créditos de carbono. Los hogares, las empresas y las organizaciones pueden comprar créditos de carbono porque desean compensar sus efectos al cambio climático, ser neutrales en carbono o buscan la reducción de su huella de carbono, a través de la adquisición de créditos de carbono como una práctica sostenible. Este actor se estudiará con mayor detalle más adelante.

Brokers. Son empresas que fungen como intermediarios comerciales entre oferentes y demandantes de los créditos de carbono. Su función principal es agilizar las transacciones y conectar a las partes interesadas en la compra de créditos, ya sean personas, empresas o instituciones. La experiencia y conocimientos especializados de los brokers contribuyen a la eficiencia y transparencia del mercado. En la tabla 5 se presentan algunos brokers que operan tanto en Colombia como a nivel internacional.

Tabla 5. *Empresas que desempeñan el rol de brokers de créditos de carbono*

Empresas	Alcance	
	Colombia	Internacional
Carbon Trust	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
South Pole	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Climate trade	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Native Energy	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Karbone	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Tradition Green	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Tucan protocol	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Fuente. Elaboración propia.

Plataformas de intercambio. Es una herramienta informática que permite la compra y venta de créditos de carbono. El diseño, operación, transparencia y mantenimiento está a cargo de empresas, como por ejemplos aquellas que aparecen en la tabla 6.

Tabla 6. Plataformas de intercambio de créditos de carbono

Empresas	Alcance	
	Colombia	Internacional
Trayport a TMX company	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
TVCM	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Carbon trade exchange (CTX)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Xpansiv	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Tucan protocol	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
ShiftCarbon	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Air Carbon Exchange	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Climate impact X	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
EEx Group	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
CME Group	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
NASDAQ, Inc	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Fuente. Elaboración propia.

Gobiernos. Los gobiernos se enfocan en la promoción de herramientas que promuevan el desarrollo de proyectos de captura de carbono que están enmarcados en la regulación nacional, es decir, tiene la responsabilidad de establecer políticas, regulaciones y marcos legales que fomenten y promuevan la participación de los demás actores en este mercado. En algunos casos, los gobiernos también pueden comprar créditos de carbono para cumplir con sus propios objetivos de reducción de GEI.

3.2 Demandantes de créditos de carbono

Como se mencionó previamente, los demandantes de créditos pueden ser diversas entidades o personas que buscan compensar, sus emisiones de GEI. De acuerdo con Sullivan *et al.* (2020), la demanda de créditos tiene dos objetivos:

La responsabilidad social corporativa (RSC) o empresarial (RSE):

Se refiere al compromiso explícito de las empresas de asumir una postura responsable hacia la protección del medio ambiente y al mejoramiento de la sociedad en general. Por medio de la adquisición voluntaria de créditos de carbono, las empresas compensan sus emisiones de GEI y contribuyen activamente a la reducción global de CO₂. Así mismo, esta acción fortalece la reputación corporativa, fomenta la confianza de los consumidores y posiciona a la empresa como referente de sostenibilidad.

Compensación individual de la huella de carbono: Se refiere a la iniciativa de una persona por asumir la responsabilidad por sus propias afectaciones al cambio climático. Esta responsabilidad se materializa mediante la adquisición de créditos de carbono, con el fin de compensar las emisiones de CO₂ generadas por sus actividades diarias, tales como: viajes, consumo de energía, uso de transporte, entre otros. De esta manera, los individuos de un país están respaldando iniciativas ambientales que reducen las emisiones en otras partes del mundo. En consecuencia, la compensación individual no sólo reduce la huella de carbono personal, sino que también contribuye a la implementación de prácticas sostenibles y de proyectos de mitigación ambiental en comunidades locales y globales.

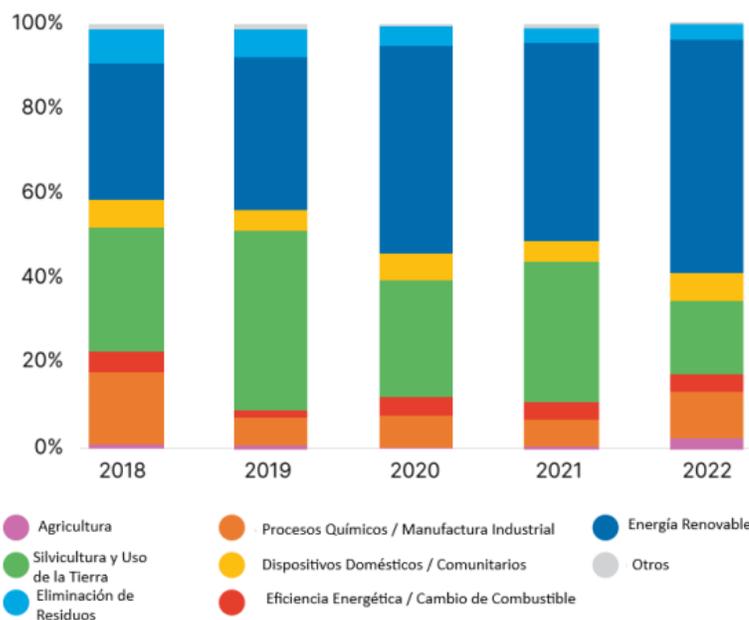
Finalmente, según el Banco Mundial (2023), existe una tendencia creciente de la demanda de créditos de carbono, lo que refleja el alto compromiso de las empresas y personas frente a la reducción de emisiones de GEI. Esta tendencia se justifica por el hecho de que los compradores de los créditos de carbono cada vez están más convencidos de que los créditos que adquieren realmente si generan adicionalidad o beneficios reales en términos de mitigación ambiental y desarrollo sostenible.

3.3 Oferentes de créditos de carbono

Como se indicó previamente, son los desarrolladores quienes inician el proceso de oferta o emisión de créditos de carbono, los cuales, una vez son certificados y auditados, son vendidos por los brokers por medio de plataformas de intercambio.

De acuerdo con el Banco Mundial (2023), la dinámica de la oferta de créditos de carbono puede analizarse distinguiendo la participación de algunos sectores ambientales. En la gráfica 3 se muestra la evolución de la participación de los sectores ambientales que han emitido créditos de carbono entre 2018 y 2023. Existen siete grandes sectores ambientales: (1) Agricultura, (2) Silvicultura y uso de la tierra, (3) Eliminación de residuos, (4) Procesos químicos/Manufactura industrial, (5) Dispositivos domésticos/comunitarios, (6) Eficiencia energética/Cambio de combustibles y (7) Energía renovable. Se observa que la participación de estos sectores ambientales ha ido cambiando en los últimos años.

Gráfica 3. Participación de los sectores ambientales emisores de créditos de carbono en el mundo



Fuente. Banco Mundial (2023).

Como puede verse, la participación de proyectos ambientales en la emisión de créditos en el sector de la energía renovable ha venido aumentando desde 2018 hasta 2022, al pasar de 32% a 54%, seguido del sector de la agricultura que inició en 2018 con una participación del 0,82% hasta lograr un 2,66% en el último año. Por el contrario, en el sector de la silvicultura y uso de la tierra se evidencia una disminución en la contribución de la oferta mundial de créditos de carbono, con una

pérdida de participación del 12,4% en 5 años (2018-2022). Este decrecimiento obedece a que los entes verificadores han restringido la elegibilidad de algunos proyectos pertenecientes a este sector.

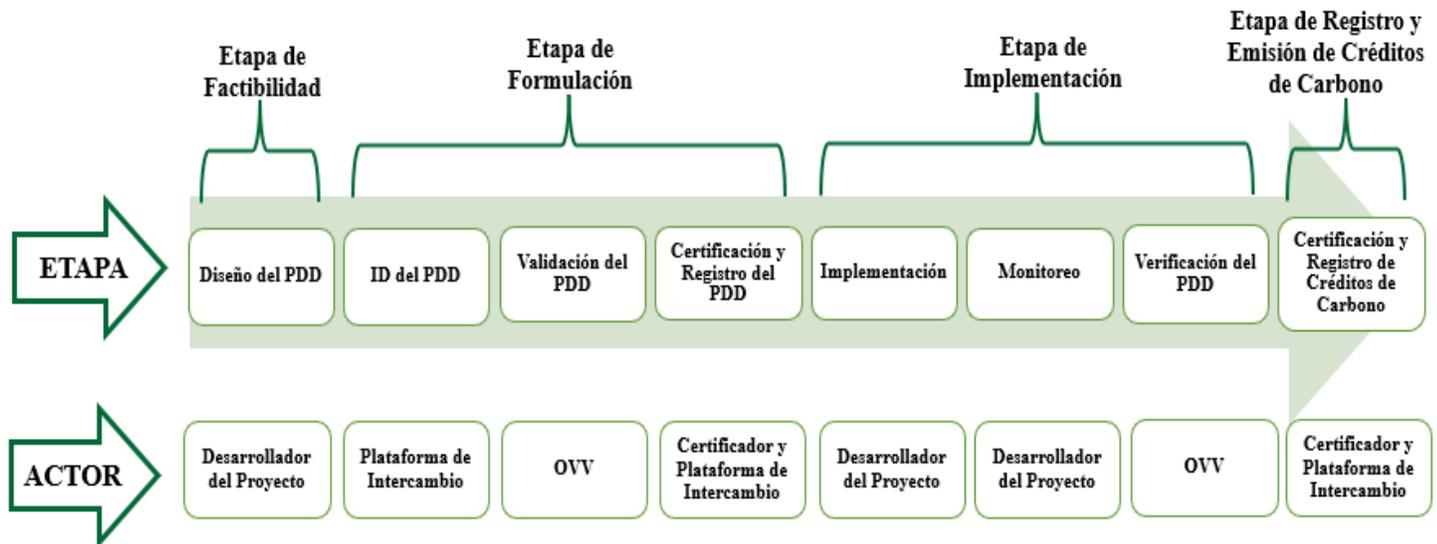
Ecosystem Marketplace (2022) estima que los créditos ofrecidos en el sector de la agricultura, así como en el sector de silvicultura y de uso de la tierra, incrementarán significativamente su participación futura, ya que el 54% de los nuevos proyectos registrados en el año 2022 provienen de estos sectores ambientales. Por su parte, el Banco Mundial (2023) considera que los países deben desarrollar capacidades humanas e institucionales para atender de manera más oportuna las solicitudes de los diferentes proyectos de mitigación ambiental, es decir, poner en marcha estrategias que eviten el retraso en el proceso de certificación de las reducciones reales de GEI, de tal manera que se aumente la oferta de los créditos de carbono.

La oferta de créditos depende esencialmente de la veracidad y transparencia en la certificación de un proyecto de mitigación ambiental, lo cual se expresa en el precio de un crédito de carbono. A su vez, el precio es el gran determinante de flujo de inversiones orientadas a proyectos ambientales.

3.3.1 Etapas de certificación de un proyecto de mitigación ambiental

Como se ha mencionado, los proyectos ambientales que permiten la emisión de créditos de carbono deben pasar por un proceso riguroso, con el fin de que se garantice que dichos créditos si representan una reducción real de los GEI. En tal sentido, resulta importante precisar las etapas conducentes a emisión de créditos de carbono y los actores involucrados. De acuerdo con la figura 2, existen cuatro etapas para que un PDD pueda ser registrado y, por consiguiente, emitir créditos de carbono: a). Etapa de factibilidad, b). Etapa de formulación, c). Etapa de implementación y d). Etapa de registro y emisión de créditos de carbono.

Figura 2. Etapas de la formulación, implementación y registro de un proyecto de mitigación ambiental conducente a la emisión de créditos de carbono



Fuente. Adaptado de CERCARBONO (2020).

a) Etapa de Factibilidad

Diseño del PDD. Es la fase inicial en la que el inversionista contrata al desarrollador para la elaboración del PDD, el cual se construye considerando la metodología a utilizar según el tipo de proyecto de mitigación que vaya a plantearse y el escenario de línea base que contiene los cálculos relacionados a los beneficios financieros y la cantidad de GEI que será mitigada. Como veremos en la siguiente sección, el PDD adopta la metodología tradicional de la formulación de proyectos de inversión basados en el cálculo de una tasa interna de retorno.

b) Etapa de Formulación

Esta etapa se compone de tres fases, donde inicialmente se realiza la identificación del proyecto a partir del PDD, para luego ser validado ante una OVV y finaliza con el registro ante el ente certificador.

Identificación del proyecto. Una vez el desarrollador haya recopilado toda la información necesaria y construido el PDD y la OVV con la cual realizará todo el proceso para la certificación y emisión de los créditos de carbono, el desarrollador elige en cuál de los entes certificadores expertos harán el registro del proyecto. El ente certificador otorgará un ID de registro al proyecto con el que se llevará a cabo todas las actividades posteriores.

Validación. En esta fase, la OVV contratada se encarga de realizar la evaluación considerando el diseño, el horizonte y la metodología propuesta para que se pueda llevar a cabo las mediciones de las reducciones de GEI esperadas con el proyecto. Si en esta evaluación el resultado es satisfactorio, se emite una declaración de validación, en caso contrario, el desarrollador deberá realizar los ajustes necesarios en el PDD para presentarse nuevamente a la evaluación.

Registro del proyecto. Superada la evaluación inicial, se registra la información correspondiente al proyecto ante el ente certificador correspondiente según el país, lo cual da por finalizada la etapa formulación. Esta información queda pública y puede ser consultada por cualquier tipo de agente.

c) Etapa de Implementación

Esta etapa se compone de tres fases. Inicia con la implementación del proyecto registrado, que después de un tiempo específico debe ser monitoreado para garantizar la efectividad relacionada con las cantidades de CO₂ capturadas, las cuales son verificadas para continuar a la etapa final del proceso de emisión de los créditos de carbono.

Implementación. Es la fase en la que el inversionista comienza a ejecutar el proyecto que puede ser, por ejemplo, del tipo REDD+ (*Reducing Emissions from Deforestation and Forest*), es decir, conservación de bosques, AFOLU (*Agricultura, Forestación y otros Usos del suelo*) o NBS (*Nature Based Solutions*), tales como uso de biochar y agricultura regenerativa.

Monitoreo. Cumplido el horizonte de tiempo determinado por la metodología aplicada, se realizan las mediciones y cálculos respectivos que permitan determinar las cantidades de CO₂ que han sido capturadas por el proyecto.

Verificación. Nuevamente la OVV interviene para dar cumplimiento al protocolo estipulado que conlleva a la certificación de los créditos de carbono que se emitirán. Para ello, se verifica el cumplimiento de las actividades, metodologías y capturas de cantidades de CO₂ que estaban indicadas en los PDD. Es importante aclarar que el proceso de validación y verificación puede hacerse en simultáneo, no obstante, los documentos que acrediten el cumplimiento en cada etapa pueden generarse de manera independiente.

d) Etapa de registro y emisión de créditos de carbono

Certificación de emisión y registro de los créditos de carbono. Una vez superado la auditoría correspondiente por la OVV, validación y verificación de las actividades, metodología y por supuesto, las cantidades de CO₂ capturadas, el inversor, en compañía del desarrollador del proyecto, pueden solicitar al ente la cantidad de créditos obtenidos, quien a su vez debe garantizar la transparencia y, en consecuencia, evitar la doble contabilidad de los créditos registrados a nombre del proyecto de mitigación.

En síntesis, para que pueda emitirse un crédito de carbono, el proyecto de mitigación ambiental del cual provenga, deberá superar de manera satisfactoria todas las etapas planteadas, a fin de garantizar la calidad de estos y efectividad en la reducción de GEI. En ese sentido, en la elaboración de un PDD, el desarrollador calcula que el proyecto ambiental es rentable cuando el VPN es positivo, y para tal fin se requiere estimar, entre otras variables, el precio del crédito de carbono.

3.3.2 La determinación del precio de un crédito de carbono

De acuerdo con la perspectiva pigouviana, el precio de una tonelada de CO₂, es decir, de un crédito de carbono, debería ser equivalente al valor descontado de los perjuicios que genera (Blanchard et al., 2023). Sin embargo, el cálculo de dicho precio es asunto bastante complejo, ya que se trata de precios monetarios que no corresponden a un bien o servicio concreto; esta perspectiva genera interrogantes vinculados a la valoración de los daños, la gestión de incertidumbres sustanciales y la elección de la tasa de descuento (Pindyck 2017).

En ese contexto, la estabilidad del proyecto de mitigación durante el tiempo estimado dependerá de la liquidez financiera que se obtenga. Como se sabe, un proyecto de inversión ambiental es viable cuando genera una rentabilidad para los inversionistas. En este caso, el desarrollador debe diseñar un PDD calculado un valor presente (VPN) positivo. Ahora, una de las variables más importantes en el cálculo del VNP es el precio esperado de crédito de carbono, el cual es el ingreso marginal reportado por el proyecto ambiental. El método más sencillo es adoptar el precio social del carbono, en adelante PSC, o precio cuenta del carbono.

En términos generales, el PSC mide monetariamente las externalidades generadas por los GEI, los cuales se miden en términos de dióxido de carbono -CO₂- arrojadas a la atmósfera. En ese sentido, Anthesis Group (2023) explica que el precio PSC se trata de un precio monetario hipotético que ayuda a las empresas a realizar proyecciones y estudios de viabilidad financiera y a comprender el riesgo que puede ocasionar las emisiones de GEI. De acuerdo con Samaniego (2019), el PSC representa el pago de un servicio ambiental que resulta ser más bajo en carbono que la alternativa que hubiese sido desechada en el proceso de inversión pública o privada. Se destacan como ventajas del PSC, las siguientes: (1) Responde a la necesidad de ponerle un precio al carbono, (2) Internaliza el uso de carbono en los proyectos de mitigación y (3) Flexibiliza la posibilidad de los países para introducir precios al carbono.

Si bien no existe una ecuación universal para calcular el PSC, se proponen dos métodos.

Cálculo del PSC a partir de los costos ambientales

El PSC más sencillo es aquel que define las externalidades como costos de las emisiones GEI por parte de una empresa u organización. Si bien no existe una ecuación universal para calcular el PSC, se propone una sencilla ecuación que es indicativa de aquellas que se usa en los proyectos ambientales.

$$PSC = \frac{CT}{Q} \quad (1)$$

Donde Q es la cantidad total de emisiones de GEI medidas en toneladas de CO_2 arrojadas a la atmósfera, mientras que CT son los costos totales de las emisiones de GEI en términos de CO_2 . Ahora, la expresión (1) se puede refinar teniendo en cuenta que la magnitud Q se compone en emisiones directas, Q_D , e indirectas, Q_I . Más precisamente, la magnitud Q_D corresponde a las emisiones de carbono generadas por las actividades de la empresa u organización, como las emisiones de gases de escape de los vehículos o las emisiones de los procesos productivos. Por su parte, la magnitud Q_I corresponde a las emisiones de carbono generadas por las actividades de los proveedores, los consumidores y otros actores relacionados con la empresa u organización, como las emisiones de los proveedores de energía o las emisiones generadas por el uso de los productos vendidos por la empresa.

Así mismo, la magnitud CT se compone en tres variables. Primero, CM , Costo de mitigación. Es el costo de reducir o eliminar las emisiones de carbono, como los costos de inversión en tecnologías limpias o el costo de cambiar los procesos productivos. Segundo, CA , Costo de adaptación. Es el costo de adaptarse a los impactos del cambio climático, como el costo de reparar los daños causados por eventos climáticos extremos o el costo de construir infraestructuras resilientes al clima. Tercero, CDA , Costo de daños ambientales. Es el costo de los impactos ambientales de las emisiones de carbono, como el costo de la pérdida de biodiversidad, la degradación de los ecosistemas o el costo de la contaminación del aire y el agua.

En consecuencia, se tiene:

$$PSC = \frac{CM + CA + CDA}{Q_D + Q_I} \quad (2)$$

Ejemplo: $PSC = \frac{\$15600 + \$32400 + \$107700}{1 \text{ Ton } \text{CO}_2 + 5 \text{ Ton } \text{CO}_2} = \frac{\$155700}{6 \text{ Ton } \text{CO}_2} = \25950 por 1 tonelada de CO_2 arrojada a la atmósfera en un año.

La determinación de todas estas magnitudes puede ser un proceso analítico complejo que involucra la consideración de diversos factores, como los costos de oportunidad y la incertidumbre.

Cálculo del PSC a partir del impuesto al carbono

El PSC mide el gasto total que paga una persona, una empresa o una organización de un país que a juicio del Estado emite GEI al estar sujetas al impuesto del carbono.

$$PSC = tQ \quad (3)$$

Donde t es la tasa de impuesto al carbono expresa en dinero por cada tonelada de emisión de GEI en términos de CO₂, mientras que la magnitud Q es la cantidad total de emisiones de GEI en las toneladas de CO₂ arrojadas a la atmósfera.

Ejemplo: Supongamos que en un país establece un $t = \$8000$ por cada tonelada de CO₂ y que una empresa emite o arroja 5 toneladas de CO₂ a la atmósfera al año.

$$PSC = \$8000 \times 5 \text{ Ton de CO}_2 = \$40000 \text{ por 1 tonelada de CO}_2$$

El Banco Mundial (2017) indica que los precios sombra del carbono son óptimos dado que el costo marginal de reducir GEI es más alto en los países industrializados que en los países en vía desarrollo. En consecuencia, el diferencial de precios sombra del carbono entre países genera un excedente monetario que podría contribuir aún más a la financiación de proyectos de mitigación en los países en vía de desarrollo, donde el costo total de implementar dichos proyectos es mayor respecto a los países industrializados.

3.3.3 Cálculo del Valor Presente Neto (VPN) en un PDD

El PSC se requiere para definir la viabilidad financiera o rentabilidad de los proyectos de mitigación de GEI dentro del PDD. Dado que el PSC se calculó por 1 tonelada de CO₂, el Banco Mundial (2017) propone que se multiplique este precio (medido en US\$) por el total de las emisiones anuales de GEI, medidas en toneladas de CO₂, en adelante Q . En este caso, el valor en

dólares anual de los GEI es $Q * PSC$. El PSC es utilizado para efectuar dos tipos de análisis: rentabilidad y costo-beneficio de un proyecto de mitigación ambiental.

Por un lado, en el análisis de rentabilidad se tiene en cuenta lo siguiente: el costo total, CT , de un proyecto ambiental es igual a los costos fijos, CF , más el costo de la externalidad ambiental negativa, CE , generada por la emisión de GEI. Esto es:

$$CT = CF + CE \quad (4)$$

Este CE será igual a la multiplicación de la cantidad de toneladas de CO_2 emitidas, Q , por el PSC , de tal manera que:

$$CT = CF + (Q * PSC) \quad (5)$$

Este CT puede ser utilizado para comparar varios proyectos de mitigación ambiental que ofrecen el mismo nivel de servicio ambiental y como criterio se escoge aquel proyecto de mitigación con el menor CT .

Es importante saber que el uso de los precios sombra del carbono para el cálculo de los costos de un proyecto ambiental, lleva a la estimación indirecta del límite *inferior* del precio del carbono, es decir, los créditos de carbono que un inversionista lleva al mercado no serán transados por un valor monetario inferior al de su costo de obtención. Este costo implica tener en cuenta las emisiones tal y como se planteó en la ecuación (1).

Por otro lado, en el caso de un análisis de costo-beneficio, el Banco Mundial (2017, p. 4) sugiere utilizar el PSC para calcular el valor presente neto (VPN) de un proyecto ambiental, por medio de la ecuación (6).

$$VPN = -CF_{t_0} + \sum_{t=1}^T \frac{\text{Beneficios}-CT-CE}{(1+\text{Tasa de interés de Descuento})^t} \quad (6)$$

Reemplazando aquí la expresión $CE = (Q * PSC)$ se tiene que:

$$VPN = -CF_{t_0} + \sum_{t=1}^T \frac{\text{Beneficios}-CT-(Q*PSC)}{(1+\text{Tasa de interés de Descuento})^t} \quad (7)$$

El VPN se calcula como el CF total en el periodo inicial más los CF de los periodos siguientes, t , en la ejecución del proyecto en cada uno de los periodos, hasta el periodo final denominado como T , traídos al periodo 0 utilizando la tasa de interés de descuento. Los CF en cada periodo se calculan como la diferencia entre los beneficios financieros menos los costos totales netos de los CE . Se sabe que, si el VPN es positivo, entonces el proyecto ambiental es rentable, y si es negativo es no rentable.

En conclusión, en este capítulo se presentó de manera detallada el mercado de carbono, el cual involucra a una variedad de actores y procesos complejos para mitigar las emisiones de GEI. Además, se destaca que el PSC desempeña un papel fundamental en la evaluación de la rentabilidad de los proyectos de mitigación ambiental y cómo se utiliza para calcular el VPN en un PDD, ya que es fundamental para que las empresas y organizaciones evalúen la rentabilidad de sus proyectos ambientales y la compensación de emisiones de GEI.

Conclusiones

1. La gestión de las emisiones de GEI se presenta como el núcleo de las políticas económicas ambientales. La exploración de herramientas como el impuesto pigouviano y la solución de Coase, proporciona enfoques teóricos para internalizar las externalidades, dando así origen a instrumentos de política ambiental como son las normas de comando y control y las iniciativas privadas como la RSC. La participación activa en el mercado de carbono, como se evidencia en la aplicación de la solución de Coase, emerge como una estrategia destacada para promover la reducción de emisiones, a pesar de los desafíos presentados por las "limitaciones al carbono". En ese sentido, se enfatiza en la necesidad apremiante de una colaboración global y la implementación efectiva de políticas y mecanismos económicos para abordar la mitigación del cambio climático.
2. Este trabajo de grado presenta las estrategias compensatorias y sancionatorias destinadas a enfrentar las emisiones de GEI, evidenciando la diversidad de enfoques que han sido adoptados a nivel internacional. Las iniciativas compensatorias, ya sean a través de mercados regulados o voluntarios, proveen mecanismos flexibles tanto para empresas como para países, buscando la compensación de sus emisiones. La distinción entre mecanismos regulados, con obligaciones de compra de créditos de carbono, y voluntarios, que permiten adquisiciones discretas, subraya la variedad de opciones disponibles para abordar las externalidades negativas vinculadas a las emisiones de GEI.

El análisis de los mecanismos asociados al mercado de carbono como el Sistema de Comercio de Emisiones (SCE o ETS), el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), el CORSIA, el Mercado Voluntario de Créditos de Carbono (MVCC) y el impuesto al carbono, permite comprender cómo estos instrumentos están intrínsecamente conectados a compromisos internacionales obligatorios. En ese sentido, el mercado de carbono impulsa la innovación, el desarrollo tecnológico y la cooperación global para abordar el cambio climático, permitiendo la compensación de emisiones de GEI. No obstante, la diversidad en el valor por tonelada de

CO₂ en distintos países, refleja la complejidad y variabilidad en las estrategias adoptadas a nivel mundial.

En síntesis, la combinación de enfoques compensatorios y sancionatorios, cada uno con sus características y estrategias propias, resalta la complejidad del desafío global que representa el cambio climático. La diversidad de estrategias y la participación de múltiples actores, desde empresas hasta gobiernos, muestran la necesidad de enfoques colaborativos y políticas efectivas para abordar la crisis ambiental.

3. La determinación del precio de un crédito de carbono es un factor decisivo en la evaluación de la viabilidad financiera de los proyectos de mitigación ambiental, particularmente, de esto depende la liquidez que se pueda obtener. El cálculo del precio de los créditos de carbono mediante el uso del precio sombra del carbono, permite cuantificar esa viabilidad financiera sobre la base de la internalización de los costos sociales provocados por los GEI. Sin embargo, el cálculo de estos precios sociales es una tarea compleja, debido a que implica cuantificar, en términos monetarios, las externalidades causadas por las emisiones de GEI. Por ejemplo, esto implica asignar un valor económico a los perjuicios que sufren la salud pública a causa de la contaminación atmosférica, a los efectos negativos que el cambio climático provoca en la agricultura, a los daños ocasionados a la biodiversidad y a los gastos relacionados con la adaptación a situaciones climáticas extremas.

En ese sentido, la correcta estimación de los precios sombra del carbono es un aspecto crucial en la formulación de los proyectos ambientales y, por lo tanto, el correcto cálculo de estos precios puede influir significativamente en el éxito de los proyectos de mitigación ambiental y, por consiguiente, en el crecimiento y correcto funcionamiento del mercado de carbono.

Referencias

Anthesis Group. (2023). *A Guide to Internal Carbon Pricing - Anthesis Group*. Recuperado en: <https://www.thesisgroup.com/internal-carbon-pricing/>

Asocarbono. (2022). *Informe sobre el estado actual del mercado colombiano de carbono del 1 de enero al 31 de marzo de 2022*. Recuperado en: <https://asocarbono.org/informe-sobre-el-estado-actual-del-mercado-colombiano-de-carbono-del-1-enero-al-31-marzo-de-2022/>

Banco Mundial (2017). *Guidance note on shadow price of carbon in economic analysis*. (n.d.). Recuperado en: <https://documents.worldbank.org/en/publication/documentsreports/documentdetail/621721519940107694/guidance-note-on-shadow-price-of-carbon-in-economic-analysis>

Banco Mundial (2023). *State and Trends of Carbon Pricing 2023. Chapter 3: Carbon crediting – markets and mechanisms* (pág. 33 – 49). Recuperado en: <https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/58f2a409-9bb7-4ee6-899dbe47835c838f>

Blanchard, O., Gollier, C., & Tirole, J. (2023). Annual Review of Economics. *The portfolio of economic policies needed to fight climate change*, 15(1), 689–722. Recuperado en: <https://doi.org/10.1146/annurev-economics-051520-015113>

Carbon Pricing Leadership Coalition. *Understanding carbon pricing*. (s.f.). Recuperado en: <https://www.carbonpricingleadership.org/what>

Carbon View. *Carbon offsetting – part 2*. (s.f.). Recuperado en: <https://carbon-view.com/carbon-offsetting-part-2/>

CERCARBONO. (s/f). 2020. *Protocolo para la certificación voluntaria de carbono (Pág. 31-36)*. Recuperado en: <https://www.cercarbono.com/wp-content/uploads/2022/07/2020.04.14-Protocolo-CERCARBONO-V-2.1.pdf>

Coase, R. H. (1960). The Problem of Social Cost. *The Journal of Law and Economics*. Recuperado en: <https://doi.org/10.1086/466560>

Ecosystem Marketplace (2022). *The State of the Voluntary Carbon Markets 2022 Q3*. Recuperado en: <https://www.ecosystemmarketplace.com/publications/state-of-the-voluntary-carbon-markets-2022/>

Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo (2020). *Ficha informativa #4: Los mercados de carbono*. Recuperado en: https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/05/12_2020_FICHA_INFORMATIVA__4_Los-mercados-de-carbono_compressed-1.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022). *Contexto Mercados de Carbono*. Recuperado en: <https://www.minambiente.gov.co/mercados-de-carbono/contexto-mercados-de-carbono/>

Paía (2021). *Carbon offsets and credits, explained*. Recuperado en: <https://paiiconsulting.com.sg/carbon-offsets-and-credits-explained/>

Pigou AC. 1920. *The Economics of Welfare*. London: Macmillan & Co.

Samaniego, J. (9 de diciembre de 2019). *El precio social del carbono como criterio clave en la evaluación de proyectos de inversión pública en América Latina*. Conferencia de Euroclima+, Comisión Económica para América Latina y El Caribe (CEPAL), Subsecretaría de Evaluación Social. Madrid, España. Recuperado en: <http://euroclimaplus.org/cop25/index.php/es/agenda-detallada/ver-calendario/eventodetalle/56/-/el-precio-social-del-carbono-como-criterio-clave-en-la-evaluacion-de-proyectos-de-inversion-publica-en-america-latina#>

Sullivan, K., Diemert, A., Cordova, C., Hoekstra, J., Haug, C., La, S., Theuer, H., De Clara, S., Netto, M., Vasa, A., Kouchakji, K., Idiarte, A., Ferreira, R., Chaparro, R., Salgado, C., Restrepo, L., Serra, L., Prolo, C., Quiros, S., Spafford, L. (s/f). *Situación y tendencias de los mercados de carbono de cumplimiento y voluntarios en América Latina*. Greenfinancelac.org.

Téllez, W., Millán, M. y Pulido, A. (2020). Boletín Impuesto al Carbono, Contraloría General de la República. *Ejecución presupuestal de los recursos del Impuesto Nacional al Carbono*. Recuperado en: <https://observatoriofiscal.contraloria.gov.co/Publicaciones/Boletin%20Impuesto%20al%20Carbono.pdf>

Tobón Orozco, D., & Vasco Correa, C. (2019). *Mecanismos de política económica ambiental: Retos en la prestación del servicio de aseo en grandes ciudades*. <https://econpapers.repec.org/bookchap/ldebookgm/07.htm>

Zhou, P., & Wen, W. (2020). European Journal of Operational Research. *Carbon-constrained firm decisions: From business strategies to operations modeling*, 281(1), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.02.050>