



**Propuesta de un Modelo para un Sistema de Comercio de Emisiones en Colombia,
Soportado en la Tecnología Blockchain
Una Mirada desde los Costos Operacionales y los Costos de Corrupción**

Edwin Esteban Valencia Toro

Santiago Vallejo Toro

Informe de consultoría para optar al título Magíster en Finanzas

Director

César Augusto Giraldo Prieto

Universidad de Antioquia

Facultad de Ciencias Económicas

Maestría en Finanzas

Medellín

2021

Cita	(Vallejo Toro & Valencia Toro, 2021)
Referencia	Vallejo Toro, S., & Valencia Toro, E. (2021). <i>Propuesta de un Modelo para un Sistema de Comercio de Emisiones en Colombia, Soportado en la Tecnología Blockchain</i> [Tesis de maestría]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Maestría en Finanzas, Cohorte VI.



Centro de Documentación Economía

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

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: M.Sc. John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Sergio Iván Restrepo Ochoa

Jefe departamento: Gustavo Adolfo Acevedo Ortíz.

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.

Tabla de Contenido

Listado de Figuras	5
Listado de Anexos.....	7
Resumen Ejecutivo.....	8
1. Marco Referencial.....	10
2. Identificación del Problema	14
3. Objetivos	18
3.1. Objetivo General.....	18
3.2. Objetivos Específicos.....	18
4. Marco Conceptual.....	19
4.1. Cambio Climático y el Sistema de Comercio de Emisiones (SCE)	20
4.2. Diseño de un Sistema de Comercio de Emisiones (SCE).....	24
4.3. Experiencias Internacionales de los Sistemas de Comercio de Emisiones (SCE)..	28
4.4. Red Centralizada vs. Red Descentralizada	32
4.5. Tecnología Blockchain y su Aplicación	32
4.6. Aplicaciones de la Tecnología Blockchain a los SCE	34
4.7. Blockchain y Sistema de Comercio de Emisiones.....	36
5. Metodología	40
5.1. Enfoque de Sistemas	40
5.2. Metodología de Marco Lógico.....	43
5.3. Mapa de Ruta De Trabajo	44
6. Diagnóstico	48
6.1. Árbol de Problemas General.....	48
7. Plan de Acción	53

7.1.	Mapa de Involucrados	53
7.2.	Relación entre Agentes	55
7.3.	Modelo Transaccional para un SCE basado en la Tecnología Blockchain	57
7.4.	Prototipo SCE Usando Tecnología Blockchain	64
7.5.	Costos de Implementación y Operación de un SCE	65
7.5.1.	<i>Costos Transaccionales</i>	65
7.5.2.	<i>Análisis de Costos de Plataformas</i>	67
7.6.	Costos de Corrupción en un SCE.....	68
7.6.1.	<i>Casos de Corrupción en SCE y sus costos asociados</i>	74
7.7.	Ventajas y Desventajas de SCE Soportado en Tecnología Blockchain.....	79
7.7.1.	<i>Ventajas</i>	80
7.7.2.	<i>Desventajas</i>	81
8.	Conclusiones y Recomendaciones	84
9.	Bibliografía	86
10.	Apéndices.....	93

Listado de Figuras

Figura 1 <i>Mercados de Carbono</i>	20
Figura 3 <i>Elementos de la tecnología Blockchain</i>	36
Figura 4 <i>Metodología de Trabajo</i>	45
Figura 5 <i>Árbol de problemas general</i>	49
Figura 6 <i>Árbol de problemas específico</i>	50
Figura 7 <i>Mapa de Involucrados</i>	53
Figura 8 <i>Funcionamiento del SCE tradicional</i>	56
Figura 9 <i>Funcionamiento del SCE con Blockchain</i>	60

Listado de Tablas

Tabla 1 <i>SCE de la Unión Europea</i>	29
Tabla 2 <i>SCE de California</i>	30
Tabla 3 <i>Elementos de los SCE de la UE y California</i>	31
Tabla 4 <i>Características y beneficios de las redes Blockchain</i>	33
Tabla 5 <i>Potencial uso de Blockchain en los SCE</i>	38
Tabla 6 <i>Comparativo SCE tradicional vs. SCE con Blockchain</i>	64
Tabla 7 <i>Costos transaccionales de SCE existentes</i>	66
Tabla 8 <i>Costos transaccionales para SCE en Colombia</i>	67
Tabla 9 <i>Comparativo de costos transaccionales anuales</i>	68
Tabla 10 <i>Casos de corrupción y costos asociados</i>	75
Tabla 11 <i>Cálculo de factor de corrupción en SCE tradicionales</i>	76
Tabla 12 <i>Inventario nacional de gases efecto invernadero para Colombia</i>	77
Tabla 13 <i>Ventajas de SCE soportado en Blockchain vs. SCE tradicional</i>	79

Listado de Apéndices

Apéndice A. <i>Sistema de Comercio de Emisiones (SCE) de la UE</i>	93
Apéndice B. <i>SCE de California</i>	96
Apéndice C. <i>Presupuesto de SCE Soportado en la Tecnología Blockchain</i>	99
Apéndice D. <i>Prototipo SCE Soportado en Blockchain de Ethereum</i>	101
Apéndice E. <i>Carta de Empresa Avalando Consultoría</i>	103

Resumen Ejecutivo

Un Sistema de Comercio de Emisiones (SCE) es un instrumento mediante el cual los gobiernos de los países pueden definir políticas para establecer un límite de emisiones de (CO₂) totales en uno o más sectores de la economía y emitir unidades de derechos de emisión comercializables que no sobrepasen el límite definido. En Colombia se aprobó la Ley 1931 de 2018 por medio de la cual se reglamentó la gestión del cambio climático, que incluye disposiciones para un programa nacional de cupos transables de emisión (PNCTE) y que es la antesala para el establecimiento de un sistema nacional de comercio de emisiones. El objetivo de este instrumento económico es lograr una senda de crecimiento baja en carbono.

La presente consultoría tiene como objetivo “Proponer un modelo transaccional para un SCE en Colombia, soportado en la tecnología Blockchain”. Este tema de investigación es de interés para diferentes actores, incluida la organización dueña de esta consultoría, XM, empresa colombiana encargada de operar el Sistema Interconectado Nacional (SIN) y administrar el Mercado de Energía Mayorista (MEM), la cual ha empezado a desarrollar y ofrecer soluciones para los mercados ambientales.

Para el desarrollo del marco conceptual se realizó un análisis de casos exitosos y consecución de datos operacionales reales de algunos SCE que están funcionando actualmente en el mundo, recogiendo los aportes cuantitativos para analizarlos desde diferentes ópticas. Posteriormente se realizó un análisis comparativo entre estos, logrando así la propuesta de un factor único que condensa distintos criterios, fases y actividades recomendadas para la ejecución y costeo del SCE a nivel local (Colombia).

Una vez hallados los factores (corrupción y costos), se cotejaron frente a los datos macroeconómicos del país y se proyectaron los valores a precios de hoy en cuanto al costo de implementación y operación de una plataforma transaccional y de registro para un SCE en Colombia. Esta información es de interés para XM y distintos actores, incluido el mismo Estado, bien sea que utilice la tecnología Blockchain o no.

El principal aporte de este proyecto para XM es el de poder evidenciar las bondades de un SCE mediante Blockchain, en aspectos como la reducción de los costos de implementación y operación, los beneficios en disminución de costos de corrupción, adicionalmente las ventajas propias de la tecnología como la transparencia, seguridad, eficiencia y trazabilidad, entre otros.

Por lo tanto, este es un insumo esencial no sólo para la empresa XM sino también para el Ministerio de Hacienda y Crédito y el Ministerio de Medio Ambiente de Colombia.

El trabajo se desarrolló bajo una metodología sustentada en un análisis de orden cuantitativo, enmarcado dentro de un estudio de casos exitosos en el mundo. Para este fin, se ejecutaron cinco fases: 1. Planteamiento del problema, objetivo general y específicos, 2. Revisión de literatura y construcción de marco conceptual, 3. Diagnóstico, 4. Análisis, diseño, desarrollo y evaluación del modelo del SCE soportado en Blockchain, y 5. Conclusiones y recomendaciones.

1. Marco Referencial

ISA y XM

ISA (Interconexión Eléctrica S.A) es un grupo empresarial multilatinamericano con más de 52 años de experiencia y trayectoria, que opera en los negocios de energía eléctrica, vías, telecomunicaciones y TIC. El grupo ISA y sus empresas están comprometidos con la mitigación y adaptación al cambio climático, el uso racional de los recursos, la implementación de programas que generen impacto positivo en el medio ambiente y el desarrollo integral de las comunidades donde opera, así como con la calidad, confiabilidad y disponibilidad de los servicios que presta (ISA, 2020).

Una de estas empresas es XM, una organización especializada en la gestión de sistemas de tiempo real, consistente en la planeación, diseño, optimización, puesta en servicio, operación, administración o gerenciamiento de sistemas transaccionales o plataformas tecnológicas, que involucran el intercambio de información con valor agregado y mercados de bienes y servicios relacionados.

XM ofrece servicios de consultoría especializada, capacitaciones y entrenamiento a la medida para operadores y en general para quienes requieran adquirir y profundizar conocimientos sobre la operación de sistemas de potencia y administración de mercados de energía. Para lo anterior, XM se soporta en una experiencia de más de 40 años en la operación del Sistema Interconectado Nacional (SIN) y más de 15 años en la administración del mercado de energía en Colombia, así como en el uso de herramientas especializadas y conocimiento del estado del arte de la industria (XM, 2020).

A través de la experiencia adquirida, XM extrapola sus conocimientos a otros sectores de la economía del país, apoyando el cumplimiento de algunos de los Objetivos de Desarrollo Sostenible y los compromisos del Acuerdo de París, en este caso para desarrollar plataformas de registro y negociación de activos ambientales.

Lo anterior se encuentra en línea con la Estrategia 2030 de la Compañía, orientada a tener un alto impacto en la reducción de emisiones, a la vez que apunta a la vigencia corporativa mediante la diversificación de sus negocios en mercados y sistemas transaccionales.

Valores Corporativos

- **Ética:** Carácter moral de nuestros actos en tanto estén encaminados hacia el bien individual o colectivo. Un pensamiento ético genera actitudes y acciones limpias.
- **Responsabilidad social:** Compromiso con la búsqueda de una mejor calidad de vida para sus empleados, sus familias, el medio ambiente y la sociedad en general.
- **Innovación:** Introducción de aspectos nuevos en la organización y en el servicio que contribuyan al logro de los objetivos.
- **Excelencia:** Cumplimiento de los estándares de calidad en la prestación de los servicios que lleve a un reconocimiento diferenciador frente a los competidores.
- **Transparencia:** Actuar de manera clara, permitiendo el entendimiento de nuestras acciones (XM, 2020).

Modelo de Negocio

Operación del SIN: En XM se coordina la operación de la cadena productiva del sector eléctrico colombiano: Planeación de los recursos de generación de Colombia, es decir, las plantas hidroeléctricas, térmicas y eólicas, entre otras (capacidad instalada de 13.405,7 Mw) y los recursos de transmisión (24.000 km de líneas) de acuerdo con la demanda de energía eléctrica de cerca de 42 millones de habitantes. Esta planeación se realiza a corto, mediano y largo plazo.

La planeación de corto plazo comprende la recepción de las ofertas diarias que presentan los generadores en la Bolsa de Energía, donde se asignan hora a hora las plantas que suministrarán la energía al día siguiente. XM realiza esta selección con criterios de seguridad y economía, para garantizarle a los usuarios un servicio con estándares de calidad, confiabilidad y eficiencia.

Administración del MEM: XM administra el Mercado de Energía Mayorista de Colombia, atendiendo las transacciones comerciales de los agentes del mercado, a quienes presta los siguientes servicios:

- Registro de las fronteras, es decir, los sistemas de medida de consumo de energía, su ubicación y su representante.
- Liquidación y facturación de los intercambios de energía resultantes entre los agentes generadores y comercializadores del mercado, que venden y compran en la Bolsa de Energía.

- Recaudo del dinero producto de las transacciones en Bolsa, y las Transacciones Internacionales de Electricidad. Así mismo, el recaudo de los servicios por transmisión nacional y regional para entregarlos a los agentes transmisores y distribuidores por el uso de sus redes.

XM realiza esta gestión administrativa promoviendo el crecimiento colectivo del sector energético y el desarrollo del comercio internacional de energía. Por este motivo, pensando en una mayor liquidez y garantía para los agentes del mercado colombiano, XM participó, en asocio con otras compañías, en la constitución de la Cámara de Riesgo Central de Contraparte –CRCC-; primer paso de apertura para desarrollar productos energéticos estandarizados, donde XM enfrenta el gran reto de implementar un sistema de negociación para darle mayor dinamismo al mercado de derivados de energía.

Estrategia

- Ser un actor clave y un habilitador de la transformación del sector.
- Promover la sostenibilidad y el crecimiento.

Apuestas Tecnológicas

- Internet de las cosas
- Inteligencia artificial
- Analítica
- Robotización
- Blockchain

XM en el Mercado de Carbono

En XM se apuesta a la innovación como un proceso intencionado, estructurado, articulado, metódico y progresivo, que contribuye a la sostenibilidad, crecimiento y generación de propuestas de valor en las que se potencian capacidades, habilidades individuales y organizacionales. En el marco de las estrategias 2030 del Grupo ISA y XM orientadas a la innovación y al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible y del Acuerdo de París, y con base en sus capacidades en mercados transaccionales, analítica de datos, tecnologías y gestión de sistemas en tiempo real, XM se puso a la tarea de innovar y crear nuevos servicios asociados a los activos ambientales.

Consistente con lo anterior, ha emprendido la implementación de *EcoRegistry*, uno de los proyectos de innovación que se han venido liderando en la Compañía. Este proyecto nace de la alianza entre XM y *Latin Checkout* después de analizar el proceso de generación de certificados de carbono y cómo la tecnología Blockchain puede aportar para optimizar procesos, aumentar la trazabilidad de la información y dinamizar el mercado de carbono.

EcoRegistry es una plataforma pionera en Colombia y América Latina, basada en tecnología Blockchain para la emisión, seguimiento y retiro de certificados de carbono. *EcoRegistry* facilita el registro de proyectos y la emisión de certificados de carbono, aportando confiabilidad, sencillez y transparencia y garantizando la trazabilidad de la información en el mercado de carbono. *EcoRegistry* es un medio para dinamizar y dotar de confiabilidad al mercado con miras a luchar frente al cambio climático.

Un sistema de comercio de emisiones requiere de plataformas transaccionales y de registro para su operación. En el caso de Colombia, la Ley de Cambio Climático y los estudios iniciales de diseño del Programa Nacional de Cupos Transables de Emisión (PNCTE) contemplan el uso de certificados de carbono. Lo anterior hace que *EcoRegistry*, como herramienta funcional para los mercados de carbono, pueda adaptarse e integrarse a las necesidades de registro y compra y venta de unidades transaccionales que contemple el PNCTE. Los avances en el diseño y desarrollo de este sistema de comercio de emisiones irán demarcando las opciones de articulación de *EcoRegistry* y XM con el PNCTE.

Teniendo en cuenta la evolución de los mercados de carbono en el país y la participación que pueda desempeñar XM, la organización está interesada en estudios que puedan profundizar sobre las formas de aplicación y ventajas o desventajas que pueda significar el uso de la tecnología Blockchain para el desarrollo e implementación de plataformas transaccionales para un Sistema de Comercio de Emisiones (SCE).

2. Identificación del Problema

De acuerdo con la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), el cambio climático se entiende como una variación del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima, observada durante períodos de tiempo comparables.

El cambio climático es uno de los mayores problemas de este tiempo y el mercado de carbono es una de las principales herramientas a nivel mundial para contrarrestar este fenómeno (United Nations Framework Convention on Climate Change [UNFCCC], 2018). Como primera respuesta global se firmó el Protocolo de Kyoto (Naciones Unidas, 1997), el cual manifiesta la necesidad de promover el desarrollo sostenible. En dicho tratado, las partes involucradas se obligaron a cumplir con los compromisos cuantificados de limitación y reducción en la generación de las emisiones de los Gases de Efecto Invernadero (GEI).

Posteriormente, en el año 2015, el Acuerdo de París surge en virtud del reconocimiento de la amenaza que implica el cambio climático y sus efectos potencialmente irreversibles para la sociedad. A todos los países incluidos en el tratado se extiende, por medio de dicho acuerdo, el compromiso de cooperación y participación en una respuesta efectiva y apropiada en relación con la reducción de las emisiones de GEI, con el fin de alcanzar el objetivo último de la CMNUCC (Naciones Unidas, 2016).

Desde un escenario local, Colombia cuenta con una Política Nacional de Cambio Climático para avanzar en una senda de desarrollo resiliente al clima y baja en carbono, cuya meta de mediano plazo corresponde a la reducción progresiva de las emisiones nacionales de GEI en un 51% respecto a las emisiones proyectadas para el año 2020 (Ministerio del Ambiente, 2020). Este objetivo se extiende a todos los sectores y fuentes de emisiones nacionales. En consecuencia, no hay más opción para la industria que revertir el efecto del cambio climático, enfrentando los costos económicos del CO₂, (*McKinsey & Co. and Ecofys, 2006*) los cuales han de ser asumidos como cualquier otro costo de producción.

El Estado colombiano tiene la necesidad de generar instrumentos que permitan mitigar el cambio climático desde la perspectiva industrial, incentivando a las empresas a innovar en tecnologías amigables con el medio ambiente, a la consecución de las metas nacionales y a realizar una transición a tecnologías bajas en emisión de carbono (Murillo, 2017). Bajo este

marco, Colombia incorporó el impuesto al carbono en el año 2016, el cual grava la compra, retiro e importación de combustibles fósiles. Por medio de este mecanismo el Gobierno fija el precio y permite al mercado determinar la cantidad de emisiones (Ley 1819, 2016). Asimismo, el Decreto 926 de 2017 permite la no causación del impuesto al carbono, a través de la neutralización de las emisiones con certificados de carbono por parte del usuario final del combustible.

Un SCE es un instrumento mediante el cual el Gobierno limita el número de emisiones totales de una economía o algunos de sus sectores, para lo cual emite un número de derechos de emisión¹ comercializables, que no sobrepase el límite establecido (*Partnership For Market Readiness and International Carbon Action Partnership* [PRM y ICAP], 2016). En Colombia, se aprobó la Ley 1931 de 2018 para la gestión del cambio climático que incluye disposiciones para un Programa Nacional de Cupos Transables de Emisiones (PNCTE), antesala para el establecimiento de un sistema nacional de comercio de emisiones. Por lo tanto, a la fecha continúan los planes para el diseño de un SCE en Colombia (ICAP, 2020).

Es de anotar que actualmente está definida la plataforma jurídica y se han realizado estudios en cabeza de *Carbon Trust*, Econometría, Universidad de los Andes y Fedesarrollo (Motu, 2019) que, basados en rutas de diseño y necesidades propias del país, presentan los elementos esenciales para el diseño e implementación de dicho instrumento. Es importante y necesario para el país desarrollar estudios que permitan definir las características de un SCE como instrumento para lograr los objetivos previamente planteados, tanto a nivel nacional como internacional, con miras a revertir los efectos del cambio climático al *status quo*. Y si bien ya se adelantan este tipo de estudios en Colombia, ninguno a la fecha ha incluido un sistema transaccional apoyado en la nueva tecnología Blockchain. (Motu, 2019)

Para la puesta en marcha de un SCE en Colombia se está en proceso de construir la formalidad e institucionalidad del sistema, se viene avanzando en la reglamentación y definición

¹ “Cada derecho de emisión corresponde a una unidad de emisiones, que normalmente es equivalente a una tonelada de CO₂” (PRM y ICAP, 2016, pág. 3).

de varios aspectos del PNCTE y todavía hay aspectos por reglamentar, para lo cual el país tiene hasta el 27 de julio de 2021.

Para el correcto funcionamiento de un SCE se debe garantizar transparencia y seguridad de la información sobre las unidades transables y las emisiones de GEI. Para tal efecto, existe un soporte esencial en la “llamada tecnología de contabilidad distribuida o Blockchain (DLT² por sus siglas en inglés, de *Distributed Ledger Technology*)” (United Nations Climate Change, 2018, pág. 1).

De acuerdo con la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, por sus siglas en inglés: *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC), la tecnología Blockchain puede ayudar a enfrentar el cambio climático, mejorando la contabilidad, transparencia y eficiencia en el mercado de carbono. Dicha tecnología puede proporcionar un mayor nivel de confianza y seguridad debido al registro convencional e integración con diferentes sistemas o plataformas para la transacción de activos de carbono. Así pues, Blockchain garantizaría automáticamente la liquidación y compensación³ de las operaciones (*United Nations Climate Change*, 2017) y le sería útil a los analistas e investigadores para acceder a esta información desde cualquier lugar del mundo, de manera inmediata, ágil y transparente.

En Colombia, XM⁴ es una empresa nacional que opera sistemas transaccionales y plataformas tecnológicas y desarrolla servicios de energía innovadores, contribuyendo a fortalecer el sector eléctrico. En el año 2018, XM emprendió una alianza con *Latin Checkout*, de la que nace, en el año 2019, *EcoRegistry*⁵: primera plataforma en Colombia y Latinoamérica

² “Una DLT es una base de datos que gestionan varios participantes y no está centralizada. No existe una autoridad central que ejerza de árbitro y verificador. El registro distribuido aumenta la transparencia -dificultando cualquier tipo de fraude o manipulación- y el sistema es más complicado de ‘hackear’” (BBVA, 2018, pág. 1).

³ La compensación y liquidación de valores son procesos esenciales, puesto que permiten materializar los trasposos de valores y de pagos entre las contrapartes de una transacción, ya sean éstas intermediarios, inversores institucionales o particulares.

⁴ <https://www.xm.com.co>

⁵ <https://www.ecoregistry.io/>

basada en tecnología Blockchain, que permite el registro, seguimiento de proyectos y certificados de reducción de emisiones, para el desarrollo del mercado de carbono.

Hoy en día, *EcoRegistry* es funcional para el mercado voluntario de carbono; sin embargo, puede ser acondicionado para otros instrumentos como el SCE de Colombia. Teniendo en cuenta que en el país no existe un modelo transaccional para un SCE basado en tecnologías tradicionales ni en Blockchain, la presente consultoría es de relevancia para XM dado su interés en el diseño del SCE en Colombia y otros países, reconociendo las ventajas y desventajas del uso de esta tecnología.

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Crear un modelo transaccional para un SCE en Colombia, soportado en la tecnología Blockchain.

3.2. Objetivos Específicos

1° Disponer de un diagnóstico que permita conocer la problemática (manifestaciones y causas) del estado actual del SCE en Colombia.

2° Identificar los agentes que inciden en el Sistema de Emisiones de Carbono a partir de las variables sociales, ambientales, económicas y regulatorias.

3° Establecer las relaciones entre los agentes y los componentes que inciden en el SCE.

4° Crear un diseño sistémico de relaciones entre los componentes transaccionales de un SCE en Colombia, soportados en la tecnología Blockchain.

5° Determinar las ventajas y desventajas técnicas del modelo tradicional vs. el modelo Blockchain en el diseño de un modelo transaccional para un SCE.

Hipótesis: Un modelo transaccional para un SCE soportado en la tecnología Blockchain ofrece ventajas comparativas frente a otras plataformas tradicionales para el mercado de carbono.

4. Marco Conceptual

Debido al acelerado cambio climático⁶ enfrentado por el mundo, el 11 de diciembre de 1997 se firmó el Protocolo de Kyoto, en el cual las partes incluidas se comprometieron a elaborar políticas y medidas de conformidad con sus circunstancias nacionales, con el fin de fomentar la eficiencia energética, promover modalidades agrícolas sostenibles, incentivar el aumento de uso de energías renovables, entre otros. La máxima de dicho acuerdo sería reducir las emisiones de gases de efecto invernadero⁷ -GEI- en un nivel no inferior a 5% al de 1990 en el periodo de compromiso comprendido entre los años 2008 y 2012, periodo que fue ampliado de 2013 a 2020 por medio de la enmienda de Doha, que lo estableció como un segundo período de compromiso (Parlamento, 2015).

Cabe resaltar que el protocolo, en su artículo 6, señala que toda parte incluida en el acuerdo “podrá transferir a cualquiera otra de esas Partes, o adquirir de ella, las unidades de reducción de emisiones resultantes de proyectos encaminado a reducir las emisiones antropógenas en cualquier sector de la economía” (Naciones Unidas, 1997, pág. 7) Esto brinda a las naciones la posibilidad de compraventa de unidades de reducción de emisiones.

Dado que las Partes con responsabilidades de reducción de emisiones en el Protocolo de Kyoto correspondían solo a países desarrollados, surge la necesidad de reforzar la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático por parte de los países en vía de desarrollo, los cuales tienen condiciones específicas y circunstancias especiales, en lo que respecta a la financiación y transferencia de tecnología. Teniendo en cuenta la prioridad de conservar y aumentar los sumideros y depósitos de los GEI, se firma el Acuerdo de París en el año 2015 para darle continuidad al Protocolo de Kyoto, en el cual se establece que cada parte deberá adoptar medidas y mecanismos de mitigación internos, adaptados a las circunstancias nacionales (UNFCCC, 2015).

⁶ “Se entiende como un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad del clima observada durante períodos de tiempo comparables” (Naciones Unidas, 1992, pág. 3).

⁷ “La mayor parte de la energía solar es absorbida por la superficie del planeta, pero aproximadamente el 30% de esta es reflejada y dispersada en la atmósfera en forma de radiación infrarroja. Parte de esta radiación es retenida por los GEI, que representan aproximadamente el 1% de la atmósfera... retienen y mantiene una temperatura idónea para nuestra supervivencia (15° a 18°)” (Ledezma & Caballero, 2013, pág. 53).

El marco conceptual que se desarrolla a continuación permitirá conocer conceptualmente los términos necesarios para la comprensión de este proyecto. A lo largo de este apartado se presentará una revisión de bases teóricas para sustentar la consultoría realizada.

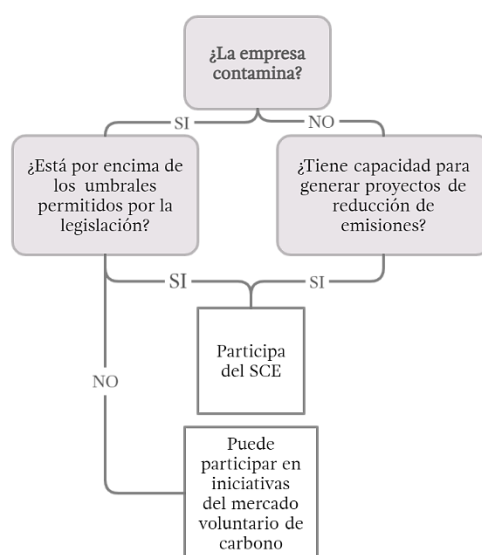
4.1. Cambio Climático y el Sistema de Comercio de Emisiones (SCE)

Uno de los mecanismos que se han definido para la reducción de los GEI es el mercado de carbono. Este último nace como respuesta a los esfuerzos para mitigar el cambio climático y a la necesidad de reducir emisiones de GEI por parte de los países industrializados. Consiste en la compra y venta de derechos que representan la captura o emisión evitada de una tonelada métrica (t) de dióxido de carbono equivalente (tCO₂e) (MADS).

La Figura 1 muestra que actualmente existen dos mercados principales para el carbono. El primero es el mercado regulado, enmarcado en reglas internacionales definidas en el Protocolo de Kyoto donde se acordó crear un mercado de emisiones de CO₂ en el que los países y las empresas podrían comprar y vender derechos o cupos de emisión, acorde a un tope o límite máximo establecido por el Gobierno. De allí surgen los SCE. El segundo es el mercado voluntario, que no se encuentra regulado e incluye una amplia variedad de relaciones comerciales y estándares voluntarios para los proyectos de mitigación, y que tendría un precio establecido para cada tCO₂ negociada.

Figura 1

Mercados de Carbono



Nota. Elaboración propia.

Un SCE es un instrumento de mercado diseñado para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y que busca internalizar en un país o región los costos que representa la externalidad negativa de la producción y consumo, entendida como las emisiones de carbono. El Gobierno, actuando como ente regulador, pone en el mercado la cantidad de emisiones de carbono, cuyo precio se asigna directamente por las fuerzas del propio mercado (PMR y ICAP, 2016). La manera en que las empresas pueden obtener los denominados derechos de emisión se da a través de dos vías:

1) Asignación gratuita: en el que a las empresas se les entrega anualmente un número determinado de derechos, según su historial de emisiones o la carbono intensidad de sus operaciones.

2) Participación en el mercado a través del modelo de subasta: si se da el caso en que por sus buenas prácticas no se sirven de ellos, las empresas podrán tener un incentivo mediante el comercio de dichos derechos (Ocampo, 2019).

La autoridad debe tener en cuenta en el diseño de un SCE el alcance de la política, periodo de diseño, monitoreo y verificación del procedimiento (Fu, Shu, y Liu, 2018) (Fu, Shu, & Liu, 2018).

Según el PMR y ICAP, en un SCE cada tonelada de carbono que emita cada uno de los participantes involucrados en este sistema tendrá que ser soportada con un derecho de emisión. Al limitar los derechos de emisión, y una vez se fije un precio en el mercado, las empresas propenderán por ser partícipes del incentivo para reducir las emisiones, entendiendo que el costo de reducirlas será menor al precio del mercado (PMR y ICAP, 2016). Además, un cupo transable de emisión representa un derecho negociable con el cual se puede emitir una tonelada de CO₂ por parte de quien lo adquiera. Dichos derechos son expedidos directamente por el Gobierno Nacional como autoridad regulatoria y una vez se redima este cupo ya no podrá ser transable nunca más por ningún agente (*Carbon Trust, 2017*).

Las organizaciones pueden comprar y vender derechos de emisión en el mercado. Este es el aspecto comercial del sistema. Por ejemplo, considerar las compañías A y B que emiten GEI y están dentro de los sectores cubiertos por el alcance del SCE. La empresa A decide que las medidas para reducir sus emisiones de GEI son costosas y emite más que la cantidad de derechos de emisión que posee. La empresa B, por otro lado, ha encontrado que implementar medidas de

reducción de carbono es relativamente fácil y tiene más derechos de los que requiere cumplir. La empresa B puede vender sus derechos adicionales a la empresa A, de modo que ambas empresas cumplan con los requisitos y no se excedan el límite total de emisiones (Motu, 2019).

De acuerdo con ICAP⁸ (2019), “cuando se busca implementar políticas climáticas a nivel nacional, los mercados de carbono siguen emergiendo y evolucionando con un rol central en la transición hacia una economía baja en carbono”. Actualmente se encuentran implementados 20 SCE que operan en cuatro continentes. En el informe diseñado por ICAP (2019) se señala que la mayoría de dichos SCE se plantean ambiciosos límites de permisos de emisiones para el año 2030, con el fin de que haya una transición de las empresas hacia dicho modelo, alineado con los objetivos climáticos. No obstante, hallar un equilibrio preciso entre los derechos de emisión y la protección de los sectores propensos a sufrir fugas de emisiones de carbono⁹ es una premisa que no se puede olvidar a la hora de implementar un SCE, ya que desvirtuaría el objetivo principal de dicho sistema.

Desde el año 2018 en Colombia, Chile y México se han implementado impuestos al carbono. Este último país también ha mostrado un gran progreso desarrollando un SCE piloto con el cual se espera cubrir el 45% de las emisiones de CO₂. Con la Ley 1931 de 2018 se configura en Colombia la base jurídica para el SCE, donde se define los cupos y se crea el Programa Nacional de Cupos Transables de Emisión -PNCTE-, con el fin de cumplir las metas nacionales en cuanto a mitigación de contaminación, la cual “es la antesala para el establecimiento de un sistema nacional de comercio de emisiones” (ICAP, 2019, pág. 72).

Otro mecanismo utilizado a nivel mundial contra la mitigación del cambio climático es el impuesto a la emisión de GEI. En Colombia el impuesto nacional al carbono fue creado por el Artículo 221 de la Ley 1819 de 2016 (Reforma Tributaria Estructural) en respuesta a la necesidad de contar con instrumentos económicos para incentivar el cumplimiento de las metas

⁸ ICAP es un foro internacional dirigido a gobiernos y autoridades públicas que han implementado o prevén implementar un SCE para gases de efecto invernadero.

⁹ Se entiende como el miedo a que algunas industrias decidan trasladar total o parcialmente la producción a otros países donde no existe un precio para el CO₂. Este fenómeno perjudicaría a diferentes sectores de la economía y también aumentaría las emisiones globales, conllevando a un detrimento de los objetivos trazados a nivel mundial (González-Eguino, 2010).

de mitigación de GEI a nivel nacional. El valor de dicho tributo para el año 2017 era de \$15.000/tCO₂e y actualmente está sobre \$17.211/tCO₂e, precio que se actualiza con el IPC+1 cada año. Al mismo tiempo, se define el Decreto 926 de 2017 que establece un procedimiento para hacer efectiva la no causación del Impuesto Nacional al Carbono, mediante carbono neutralidad, a través de la compra de certificados de carbono por parte del usuario final de los combustibles.

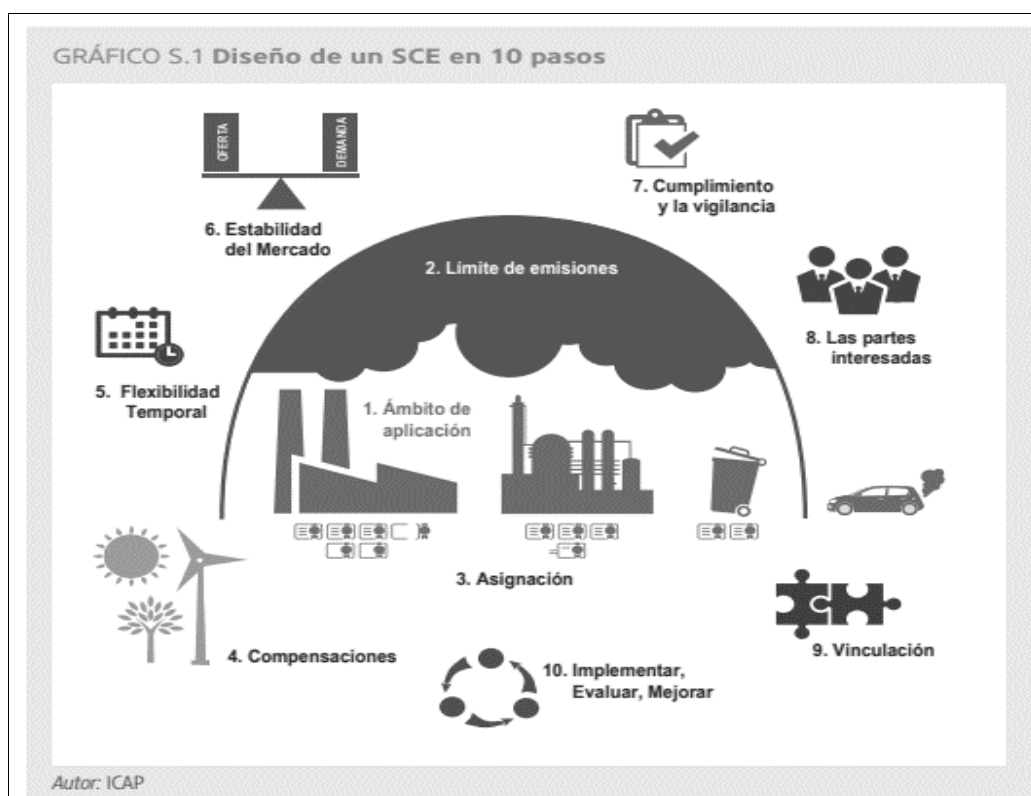
El objetivo principal de un SCE en Colombia es ayudar al país a alcanzar sus objetivos climáticos según su compromiso adquirido, que es una reducción del 51% en las emisiones de GEI, en comparación con el escenario para 2030. Otro objetivo de un SCE potencial en Colombia es contribuir al crecimiento verde del país, al aumento de las estrategias bajas en carbono y atraer inversiones para un crecimiento económico resistente y sostenible. Un SCE también tiene el potencial de ofrecer ganancias colaterales significativas, como aumentos en la eficiencia y la productividad para los sectores energético, industrial, agrícola y forestal, beneficios para la salud gracias a una disminución de la contaminación del aire, reducción de inundaciones a través de la reforestación, así como protección de la biodiversidad y medios de vida comunitarios mediante la preservación forestal (Motu, 2019). Esto se da con la inclusión de certificados del mercado voluntario en el SCE.

4.2. Diseño de un Sistema de Comercio de Emisiones (SCE)

A continuación, la Figura 2 describe los diez pasos clave que intervienen en el diseño de un SCE. Aunque cada uno de los pasos es necesario para implementar un SCE, estos no rigurosamente tienen que seguir un orden específico.

Figura 2

Diseño de un SCE en diez pasos



Nota. Tomado de (PMR y ICAP, 2016).

Paso 1: Definir el Ámbito De Aplicación

En este paso se revisa la zona geográfica, los sectores, las fuentes de emisión y los GEI a regular. Define además los límites de la política pública, por lo tanto, tiene implicaciones para el número de entidades reguladas y el esfuerzo común en la reducción de emisiones en toda la economía.

En la determinación del ámbito de aplicación del SCE existen diferencias entre los sectores y las fuentes de emisión, puesto que es preciso caracterizar el perfil de emisiones del territorio y su equivalencia para una potencial reducción, además de la capacidad y el costo del monitoreo dentro de la regulación de las fuentes de emisión.

Paso 2: Establecer el Límite de Emisiones

Es el número de derechos de emisión permitidos durante un plazo de tiempo específico, también denominado CAP o límite, cuyo propósito es establecer un punto de referencia con relación a la cantidad total de emisiones producidas por las entidades reguladas.

La determinación de un límite es un acto de equilibrio que busca una dinámica incentivadora en la reducción de emisiones, el acceso a las compensaciones, la vinculación con otros SCE y las diferentes formas de contención de gastos.

La definición del límite está a cargo de los tomadores de políticas públicas, quienes deben alinear el objetivo de mitigación general del territorio con la meta objetiva, asignando la correspondiente responsabilidad por sectores y de acuerdo con los volúmenes de contaminación emitidos por cada uno de ellos.

Paso 3: Asignar Derechos de Emisión

La distribución de derechos merece una atención especial en cuanto puede influir en la eficiencia del sistema y hacer uso de diferentes metodologías de asignación, como lo son el uso gratuito, la subasta, una posible combinación entre las dos anteriores o la adjudicación de emisión por absorción.

Paso 4: Considerar el Uso de Compensaciones

El SCE puede permitir que las entidades reguladas usen “compensaciones”, esto es, certificados derivados de la reducción de emisiones en fuentes y sectores no regulados, para cumplir las obligaciones bajo el límite.

Su origen puede darse a través de varias fuentes, bien sea desde entidades de sectores no regulados dentro de su territorio o de entidades no reguladas por fuera del territorio.

La modalidad de compensaciones puede apoyar el aprendizaje y la colaboración entre fuentes no reguladas y facilitar flujos de inversión hacia otros sectores para estimular el

desarrollo bajo de emisiones. En caso de existir un impuesto al carbono, el diseño del SCE debe contemplar los procedimientos para hacer la compensación vía impuesto al carbono.

Paso 5: Decidir sobre la Flexibilidad Temporal

Un SCE puede proporcionar cierta flexibilidad para las entidades, en referencia a cuándo utilizar los permisos de emisión. La flexibilidad es un atractivo de un SCE para entidades que quieran reducir las emisiones. No obstante, dicha sincronización deber ser equilibrada en relación con la certidumbre de lograr reducciones.

Limitar los periodos de cumplimiento de 1 a 3 años asegura una pronta mitigación y la actividad del mercado, lo cual produce un avance hacia el logro de los objetivos de reducción.

Paso 6: Considerar la Previsibilidad de Precios y Evaluar Mecanismos de Contención de Costos

En un SCE la variabilidad de precios en el tiempo permite a las empresas alcanzar una determinada cantidad de emisiones al menor costo posible, toda vez que el precio depende de la variabilidad de la actividad económica, la volatilidad, el comportamiento del mercado de combustibles, la incertidumbre en las estimaciones de costos marginales en la reducción de emisiones y los posibles cambios de política pública.

El diseño de un SCE puede disminuir la volatilidad potencial y la incertidumbre acerca de los precios. El diseño como tal se puede estructurar, bien sea orientado a la cantidad de derechos de emisión o al establecimiento de restricciones sobre el precio y el grado de discrecionalidad que se les otorga a los tomadores de decisiones políticas.

Los parámetros para la fijación de precios tienen por finalidad guiar hacia una transición gradual para una economía baja en carbono, a un costo política y socialmente aceptable.

Paso 7: Garantizar el Cumplimiento y la Vigilancia

Un SCE requiere de un enfoque de aplicabilidad rigurosa de las obligaciones de los participantes, así como de la vigilancia del sistema por parte el Gobierno. La falta de cumplimiento y vigilancia pueden amenazar no solo los resultados de las emisiones por parte de entidades no reguladas, sino también la funcionalidad básica del mercado, con altos riesgos económicos para todos los participantes. Por lo tanto, dentro del esquema de vigilancia es preciso tener en cuenta:

- a) Identificar las entidades reguladas.
- b) Gestionar los reportes de emisiones por parte de las entidades reguladas.
- c) Aprobar y administrar el desempeño de los verificadores.
- d) Establecer y supervisar el registro del SCE.
- e) Diseñar e implementar el enfoque de sanción y aplicabilidad.
- f) Regular y vigilar el mercado para unidades de emisiones de SCE.

Paso 8: Involucrar a las Partes Interesadas, Comunicar y Fortalecer Capacidades

Un SCE exitoso requiere de la voluntad política permanente y de la colaboración y la confianza entre los actores y el Gobierno, garantizando la viabilidad del sistema a largo plazo.

Siendo la participación un elemento trazador durante el proceso, es preciso identificar plenamente las partes y sus posiciones; elaborar un proceso transparente en la toma de decisiones, estableciendo una alineación de políticas públicas; mantener una estrategia de canales de comunicación que permita conocer las preocupaciones públicas y resolver las necesidades de fortalecimiento de la capacidad del SCE.

Paso 9: Considerar la Vinculación con otros SCE

La vinculación se produce cuando un SCE permite que las entidades reguladas utilicen unidades (derechos de emisión) expedidos bajo el sistema de otro país como moneda válida para el cumplimiento, con o sin restricciones. La vinculación amplía la flexibilidad con relación a dónde pueden ocurrir las reducciones de emisiones, de esta manera se puede aprovechar una gama más amplia de oportunidades de reducción.

La vinculación también puede incurrir en riesgos, pues es posible que los recursos financieros sean transferidos al extranjero. No obstante, una vinculación completa puede traer grandes beneficios económicos, mientras que una vinculación restringida, es decir, aquella donde se utiliza solo un porcentaje de moneda extranjera, se torna más fácil en cuanto al diseño y la forma de control.

Paso 10: Implementar, evaluar y mejorar

Pasar del diseño a la operación de un SCE requiere que reguladores del Gobierno y participantes del mercado asuman nuevos roles y responsabilidades, incorporen nuevos sistemas e instituciones y lancen un mercado comercial funcional.

Su implementación gradual se debe llevar a cabo a través de un piloto que permita determinar condiciones referentes a la confianza en las instituciones y en el uso del SCE. Las revisiones regulares de desempeño del SCE a cargo de una evaluación individual rigurosa permitirán la mejora continua y la adaptación (PMR y ICAP, 2016).

4.3. Experiencias Internacionales de los Sistemas de Comercio de Emisiones (SCE)

Alrededor del mundo existen varios SCE en implementación y pruebas piloto y el esquema de comercio de derechos de emisión de la Unión Europea (EU ETS) destaca por:

- Ser el primer SCE multinacional y es hasta ahora el mercado de comercio de emisiones GEI más grande del mundo.
- Establecer un sistema por límites máximos de emisiones y de comercio.
- Puede verse como un prototipo del sistema multinacional de comercio de emisiones de GEI que a menudo se presenta como una posible arquitectura para un eventual régimen climático global (Aldy y Stavins, 2008).

Sin embargo, la débil estructura política de la UE la lleva a presentar importantes disparidades en las circunstancias económicas, el desarrollo institucional y la voluntad política que existe entre sus estados miembros, pues a diferencia de EE. UU no es una unión federal fuerte y sus integrantes son naciones independientes en sus principales atributos de soberanía, lo que la hace objeto de estudio interesante (Ellerman, 2008).

A continuación, con el fin de contextualizar los elementos de diseño de un SCE real, se presentan los detalles de dos de los SCE más grandes en la actualidad.

1) Unión Europea (European Union Emissions Trading System, EU ETS)

El SCE de la UE es una piedra angular de la política de la Unión Europea para combatir el cambio climático y dar ejemplo al resto del mundo y es una herramienta clave para reducir de forma costo-efectiva las emisiones de GEI de los sectores regulados. El sistema cubre

aproximadamente el 45% de las emisiones de la UE de los sectores eléctrico, industria manufacturera y aviación (limitada a vuelos dentro del Espacio Económico Europeo). Es el SCE más antiguo y grande del mundo y ha tenido diferentes fases (periodos) a lo largo de los años. Inició en 2005 y actualmente se acerca al final de la tercera fase comercial (2013-2020), lo que implica que la mayoría de los sectores de la economía han sido incluidos. Durante la fase uno (2005-2007) se incluyeron empresas de energía y petroleras, en la fase dos (2008-2012) se incluyó la aviación. De acuerdo con la legislación actual, en la fase cuatro (2021-2030) no se han definido nuevos sectores a incluir.

Los objetivos del SCE de la UE para 2020 eran reducir las emisiones en un 20% por debajo de los niveles de GEI de 1990, un 40% para el 2030 y para 2050 los líderes de la UE se han comprometido a alcanzar la carbono neutralidad.

En la Tabla 1 se resumen las características más importantes del SCE de la Unión Europea, entre ellas el límite del año 2020 y los ingresos recolectados en 2019.

Tabla 1

SCE de la Unión Europea

CAP o Límite	Gases	Compensaciones y Créditos
1816 MtCO ₂ e (2020)	Varios Gases	Compensaciones internacionales hasta el final de Fase 3 (2013-2020)
Asignación	Precio Promedio 2019	Ingresos Totales
Asignación gratuita (basada en puntos de referencia)	24,84 EUR / tCO ₂ (27,81 USD)	50,54 mil millones de euros (58,97 mil millones de dólares) desde el comienzo del programa.
Subasta		14,64 mil millones de euros (USD 16.41 mil millones) recolectados en 2019

Nota. Elaboración propia con datos de (ICAP, 2020).

2) California (California Cap-and-Trade Program)

El Programa de *Cap-and-Trade* de California comenzó a funcionar en 2012 con la apertura de su sistema de seguimiento para la asignación, distribución de subastas y comercialización de instrumentos de cumplimiento. Las primeras obligaciones de cumplimiento comenzaron en enero de 2013. California ha sido parte de la iniciativa del clima occidental desde

2007 y ha vinculado formalmente su sistema con el de Québec en enero de 2014 y con Ontario en enero de 2018 (hasta la terminación de este último a mediados de 2018).

El programa de California cubre fuentes responsables de aproximadamente el 80% de las emisiones de GEI del Estado. En 2017 se aprobó una legislación (proyecto de ley de la Asamblea [AB] 398) para proporcionar dirección sobre el programa *cap-and-trade post-2020* para ayudar a alcanzar los objetivos climáticos de California. La Junta de Recursos del Aire de California (CARB), que desarrolló y regula el programa, luego emitió regulaciones en 2018 para alinear el futuro del programa con AB 398. Entre las enmiendas clave están la adición de un precio máximo, la inclusión de dos asignaciones de niveles de reserva de contención de precios por debajo del precio máximo y reducciones en el uso de compensaciones.

Los objetivos de reducción del SCE de California para 2020 eran regresar a los niveles de GEI de 1990, para 2030 tener una reducción del 40% de los niveles de GEI de 1990 y para para 2045 lograr neutralidad de carbono.

En la Tabla 2 se resumen las características más importantes del SCE de California, en ella se puede establecer diferencias con el SCE de la Unión Europea.

Tabla 2

SCE de California

CAP o Límite	Gases	Compensaciones y Certificados de Emisión
334,2 MtCO ₂ e (2020)	Varios Gases	Compensaciones nacionales
Asignación	Precio Promedio 2019	Ingresos Totales
Asignación gratuita (basada en puntos de referencia) Subasta	16,84 USD tCO ₂	USD 12.5 mil millones desde el comienzo de programa, USD 3.07 mil millones recolectados en 2019

Nota. Fuente: Elaboración propia con datos de (ICAP, 2020).

A continuación, la Tabla 3 muestra un resumen con la información comparativa de ambos SCE. El detalle de la información se puede encontrar en el Anexo 1 y el Anexo 2.

Tabla 3*Elementos de los SCE de la UE y California*

	Unión Europea	California
<i>Tamaño del SCE</i>	Límite de las emisiones para el año 2020 es de 1,816 MtCO ₂ e (millones de toneladas de CO ₂). Las entidades cubiertas son 10,744 centrales e instalaciones.	Para el 2020 334,2 MtCO ₂ e (Millones de toneladas de CO ₂). Las entidades cubiertas son aproximadamente 500 (2015-2017).
<i>Distribución</i>	Asignación gratuita y subastas.	Asignación gratuita y subastas.
<i>Flexibilidad temporal</i>	<i>Banking</i> permitido y préstamos de periodos futuros no permitido.	<i>Banking</i> permitido y préstamos de periodos futuros no permitido.
<i>Estabilidad del mercado</i>	Se tiene una reserva de estabilidad del mercado y umbrales de precios.	Precio mínimo disponible en subasta que aumenta anualmente 5% más inflación y reserva para regular precios.
<i>Cumplimiento</i>	Reporte de emisión antes del 31 de marzo, entrega de derechos de emisión al 30 de abril del mismo año.	Entrega del 30% de derechos de emisión al 1 de noviembre, entrega del total de derechos al 1 de noviembre del año siguiente.
<i>Monitoreo, reporte y verificación</i>	Se requiere un plan de monitoreo para cada instalación y operador (aprobado por una autoridad competente), así como verificación y acreditación de verificadores.	Los operadores requieren informes cuando emiten por encima de 10,000 tCO ₂ e por año. Los operadores deben implementar auditorías, aseguramiento de la calidad y sistemas de control para el programa de informes y los datos informados.
<i>Sanciones</i>	Multa de 100 EUR / tCO ₂ (USD 112 / tCO ₂) por cada tonelada de CO ₂ emitido por el cual no se ha entregado ninguna asignación.	Debe entregar cada derecho de emisión faltante y tendrá que entregar tres derechos adicionales para cada derecho de emisión de cumplimiento que no logró cumplir.
<i>Enlaces con otros sistemas</i>	El vínculo entre el SCE suizo y el SCE de la EU entró en vigor el 1 de enero de 2020.	California se vinculó con el ETS de Quebec el 1 de enero de 2014.
<i>Uso de ingresos</i>	Los ingresos de la subasta de derechos de emisión pertenecen a los estados miembros. Al menos el 50% de los ingresos deben ser utilizados para fines relacionados con el clima y la energía.	Los ingresos van al fondo de reducción del GEI, de los cuales el 35% beneficia a las comunidades desfavorecidas y de bajos ingresos.
<i>Plataforma de registro y transaccional</i>	Los estados participantes tranzan derechos de emisión en el <i>European Energy Exchange</i> (EEX). Alemania, Polonia y Reino Unido tranzan en el <i>Intercontinental Exchange</i> de Reino Unido.	La fundación <i>Western Climate Initiative, Inc.</i> (WCI, Inc.), fue creada en 2011 para administrar el SCE de California y Quebec.

Nota. Elaboración propia con datos de (ICAP, 2020) al segundo semestre de 2020.

4.4. Red Centralizada vs. Red Descentralizada

Tradicionalmente los servicios web han sido ofrecidos por empresas desde servidores centrales, donde existe un solo punto de control, lo cual puede generar riesgos para la información en caso de un hackeo o fallos del sistema. Con el desarrollo de la tecnología se han creado redes que cuentan con varios servidores para alojar datos que pueden ser compartidos de manera descentralizada, lo que ha permitido el desarrollo de aplicaciones más seguras, gracias a que la información está protegida en diferentes servidores, evitando el fraude y el control de un tercero que actúa como intermediario (Braden, 2019). Esta es la idea que ha dado origen a las redes distribuidas como Blockchain, que utiliza criptografía, matemáticas y poder computacional para crear una red segura en la cual se pueda transferir valores entre usuarios sin la necesidad de un intermediario y sin riesgos de vulneración o pérdida de la información (Swan, 2015).

4.5. Tecnología Blockchain y su Aplicación

Las bases técnicas del Blockchain se dieron inicialmente por el matemático Alan Turing, considerado el padre de la criptografía¹⁰, quien durante la Segunda Guerra Mundial logró descifrar los códigos de “Enigma”, la máquina que utilizaban los alemanes para sus comunicaciones (BBVA, 2017). “Una Blockchain es un conjunto de nodos que, conectados a una red descentralizada, utilizan un protocolo estándar con el objetivo de validar y almacenar la misma información registrada en una red P2P. Es una tecnología que permite tener una base de datos distribuida entre una red de ordenadores” (Mitre Abuhayar et al., 2018, pág. 32).

En el año 2008, Nakamoto¹¹ introdujo el primer concepto de criptomoneda a través del Bitcoin, como propuesta de transferencia de efectivo electrónico entre personas, sin utilizar intermediarios. Para ello se utiliza la tecnología del Blockchain, red virtual donde individuos que no se conocen pueden efectuar intercambio de valores a través de internet sin necesidad de un tercero que medie la transacción (Corbet, Lucey, Urquhart, y Yarovaya, 2018). Desde su

¹⁰ “La criptografía es esencial en ‘blockchain, donde la información es compartida de forma encriptada por enormes redes de ordenadores sin ninguna jerarquía” (BBVA, 2017, pág. 1).

¹¹ Satoshi Nakamoto es un pseudónimo utilizado para cubrir la identidad real de los desarrolladores de Bitcoin (De Filippi y Wright, 2018). Podría ser una o varias personas, pues hasta el momento su identidad es incierta.

creación esta tecnología ha generado un gran interés por parte de diferentes actores empresariales y académicos (Zheng, Xie, Dai, Chen, y Wang, 2017) que buscan en ésta la creación de nuevos modelos de negocio y la transformación de los existentes (Cai, Du, Gan, Zhang, y Huang, 2018).

Blockchain funciona como un sistema descentralizado, en el que se registran todas las actividades en tiempo real de manera que no se pueden modificar ni alterar posteriormente, brindando mayor confianza y transparencia a las transacciones. A diferencia de una base de datos centralizada en poder de una sola empresa o entidad, continúa funcionando incluso cuando los participantes individuales se retiran. Crea un registro indeleble, resistente a la manipulación de cualquier parte individual GIZ (2019).

La tecnología Blockchain proporciona nuevas formas de intercambio y almacenamiento seguros de datos y activos digitales, diseñados principalmente para plataformas de transacciones punto a punto. No requiere necesariamente una infraestructura de Tecnologías de la Información (TI) de alto nivel desde el principio, ya que permite la incorporación de funcionalidades a lo largo del tiempo. Por lo tanto, Blockchain puede tener un impacto verdaderamente global en la transferencia de valores digitales y, para este caso que nos concierne, en el mercado de carbono (GIZ, 2019).

A continuación, la Tabla 4 resume las características claves y los beneficios de las redes Blockchain.

Tabla 4

Características y beneficios de las redes Blockchain

Características	Beneficios
Compartido públicamente	Los servidores o nodos mantienen las entradas (bloques) y cada nodo vigila los datos de la transacción en los bloques, cuando se crean.
Descentralizado	No se requiere autoridad central para aprobar transacciones y establecer reglas.
Seguro	La base de datos es un registro inmutable. Los registros no pueden revisarse ni manipularse, ni siquiera por los operadores de la base de datos.
Confiable	Blockchain tiene un mecanismo de consenso, que a través de matemáticas y poder computacional permite que ocurran transacciones

	de forma segura entre participantes de la red, aun cuando estos se desconocen.
Automatizado	El software que permite operaciones basadas en Blockchain evita la entrada de transacciones conflictivas o transacciones dobles en la base de datos. Usando contratos inteligentes, se pueden programar ciertas funciones y acontecimientos para que ocurran automáticamente, una vez ciertas condiciones son dadas.

Nota. Elaboración propia con datos de GIZ (2019).

Diferencia entre las Redes Blockchain

Existen dos tipos de redes Blockchain, denominadas públicas y privadas. Una red pública es accesible para todos los usuarios de Internet. La naturaleza pública proviene de la participación libre e incondicional de todos los participantes en el proceso de determinación sobre qué bloques se agregan a la cadena y cuál es su estado actual (Buterin, 2015). Las cadenas de bloques totalmente descentralizadas se basan en un mecanismo de consenso de prueba de trabajo (o prueba de participación) para fines de validación (Pilkington, 2016).

En una red totalmente privada, los permisos de escritura son monitoreados por un administrador central que toma las decisiones y define las reglas. Para participar se requiere la autorización del creador de la red y solo los que tienen permiso pueden acceder a ella.

Como concluyen Holub y Johnson (2018), el interés inicial en Blockchain ha sido técnico, pero con el incremento de los precios de las criptomonedas y los casos de aplicación de esta tecnología a diferentes áreas económicas y empresariales, la atención de los gobiernos en la regulación de estos mercados y su uso es cada vez mayor. Actualmente hay una gran investigación en la adopción de Blockchain (Hughes, Park, Kietzmann, & Archer-Brown, 2019), y está dado que nuevas aplicaciones van a surgir en el futuro en diversas áreas. Aunque todavía está en sus inicios, no se deben subestimar los impactos extraordinarios de los cambios producidos por esta tecnología (Pilkington, 2015).

4.6. Aplicaciones de la Tecnología Blockchain a los SCE

Los *Smart Contracts* o contratos inteligentes se refieren a cualquier acuerdo que se formalice mediante scripts o códigos de computador para formalizar cláusulas. Una vez finalizado este acuerdo y se produzca un evento desencadenante, la producción de eventos programados se ejecuta automáticamente sin que quepa modificación, bloqueo o inexecución de

la prestación debida (Echebarría, 2017). Estos contratos inteligentes se alojan en las redes Blockchain y pueden usarse para formalizar y/o establecer las condiciones de relacionamiento y transacción entre los mismos participantes de la red.

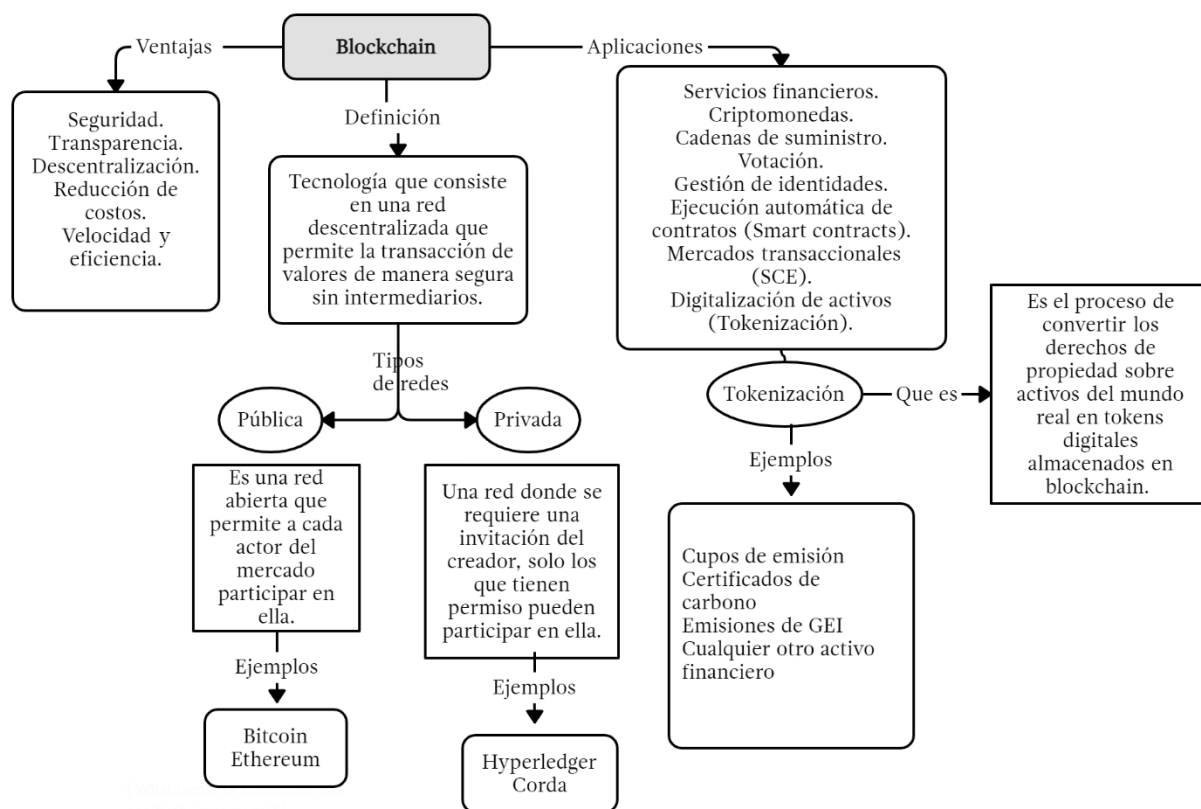
La tokenización digital nace con la red Ethereum, como un proceso que permite convertir derechos de propiedad sobre activos tangibles e intangibles en tokens digitales o contratos inteligentes que pueden ser almacenados y transferidos en una red Blockchain (Y. Chen, 2018). Activos del mundo real como bonos, títulos de propiedad, acciones, oro, activos físicos, certificados de carbono o derechos de emisión; pueden ser representados digitalmente y ser transferidos entre personas de manera rápida, eficiente y a un bajo costo (Au y Power, 2018).

En el año 2015 se crea la plataforma Hyperledger impulsada por IBM, una plataforma de Blockchain privada para usos empresariales con consenso propio, alto rendimiento y fiabilidad. A diferencia de Ethereum, Hyperledger optó por no constituirse como criptomoneda. Además, identifica a los usuarios a través de certificados que proporcionan datos personales incluido la clave pública.

La Figura 3 presenta de forma gráfica una síntesis conceptual para los elementos más importantes de la tecnología Blockchain, previamente mencionados.

Figura 2

Elementos de la tecnología Blockchain



Nota. Elaboración propia con datos de (Au y Power, 2018).

4.7. Blockchain y Sistema de Comercio de Emisiones

Romper con esquemas y barreras propias de la economía resulta una tarea compleja para el funcionamiento de los mercados de carbono. Como ejemplo de experiencias internacionales, los Sistemas de Comercio de Emisiones han fallado por diferentes causas, entre ellos la sobreasignación de cupos que podría deberse a una falta de información precisa (*The Carbon Trust*, 2017).

Marke (2018) analiza la conexión entre la revolucionaria tecnología Blockchain y los esfuerzos globales por combatir el cambio climático, presentando el diseño de un ecosistema para los certificados de carbono, mediante el uso de esta tecnología. Iniciativas como

*Climatrade*¹², *Veridium*,¹³ *DAO IPCI*¹⁴ (*Integral Platform for Climate Initiatives*) y *EcoRegistry*¹⁵ trabajan en el desarrollo de plataformas para usar la tecnología Blockchain en los mercados voluntarios de carbono (Howson et al., 2019).

La confianza y credibilidad de las transacciones entre los diferentes participantes se verá incrementada por el uso de la tecnología Blockchain, dado que es inmune a las falsificaciones. “La distribución, transferencia, compensación e inventario de la asignación de carbono se efectuarán de manera irreversible” (Fu, Shu, & Liu, 2018). Estos mismos autores señalan que diferentes estudios muestran que la información que provee Blockchain podría ayudar a evitar fraudes, proteger el sistema y evitar problemas de doble contabilidad; además, se podría diseñar un sistema con dispositivos inteligentes que permita medir más fácilmente las emisiones de carbono con menos fuerza laboral humana.

De acuerdo con (GIZ, 2019), y respecto al potencial de la tecnología Blockchain para el comercio de emisiones, se examina la idoneidad de su uso para un registro de transacciones de emisiones. La tecnología Blockchain permite la transacción transparente de valores digitales mediante la tokenización que representa activos reales del mundo. Por lo tanto, las características de esta tecnología proporcionan elementos adecuados para respaldar la operación de mercados completamente nuevos como son los SCE.

La Tabla 5 muestra una descripción general de los desafíos actuales de los SCE y el potencial asociado para la tecnología Blockchain.

¹² “Se presenta como un modelo de negocio “*token-as-a-service*”, es decir un modelo de negocio que se basa en la emisión de tokens. Estos permiten a los contribuyentes comprar un token vinculado a un certificado de carbono y permitirá comprar certificados carbono procedentes de proyectos amigables con el medio ambiente a través de un portal de intercambio de certificados de carbono basado en la tecnología Blockchain” (Miró Calatayud, 2018, pág. 62).

¹³ “Veridium Labs es una iniciativa de colaboración que automatiza la contabilidad del impacto ambiental y el proceso de compensación en las cadenas de suministro corporativas y crea un mercado global para activos ambientales digitalizados” (Veridium, s.f.). <https://www.veridium.io/>

¹⁴ Para más información, visitar el sitio web <https://ipci.io/>

¹⁵ Para más información, visitar el sitio web <https://www.ecoregistry.io/>

Tabla 5*Potencial uso de Blockchain en los SCE*

Elemento del SCE	Desafíos	Potencial de Blockchain
Sectores cubiertos (alcance)	Actualmente limitado, solamente emisores de grandes industrias, cubiertos debido a altos costos de las transacciones.	Alcance mejorado debido al menor costo de transacción dado por la automatización de los procesos del SCE usando Blockchain.
Límite de emisiones	Los límites de emisión son el resultado de decisiones políticas que pueden afectar negativamente la planificación a largo plazo.	Incorporación de reglas de asignación y las cantidades a asignar en un protocolo transparente de Blockchain pueden fortalecer las estructuras del SCE.
Distribución de derechos de emisión	La distribución de derechos de emisión a través de subastas no es transparente, esto podría convertirse en un problema para SCE vinculados con otros SCE.	La subasta basada en Blockchain podría servir como puerta de enlace para una red de plataformas de subasta nacionales conectadas.
Políticas de compensación	Riesgo de doble conteo.	Un registro en Blockchain conjuntamente administrado por varios países garantiza que las compensaciones generadas se codifiquen en Blockchain y sean conciliadas con los registros nacionales.
Mecanismo de comercio	Delitos de cuello blanco como fraude de valores, uso de información privilegiada, lavado de dinero, transferencia de precios erróneos y delitos en internet.	Los riesgos pueden ser minimizados usando tecnología Blockchain.

Nota. Tomado de (GIZ, 2019).

Una herramienta crucial para cualquier SCE es una plataforma de registro de transacciones. Un registro de transacciones de emisiones forma la columna vertebral administrativa de un SCE. Estos sistemas establecen mercados donde se establecen límites sobre el tipo y la cantidad de toneladas de CO₂ que los sectores industriales y económicos pueden liberar. Un número igual de derechos (digitales) se crean y distribuyen a los participantes del SCE al comienzo de un período previamente definido.

Las compañías con excedentes de derechos de emisión pueden venderlos en el mercado secundario a compañías que tienen más emisiones que derechos de emisión. Para gestionar las transacciones (asignación, transferencia, entrega, cancelación) de derechos de emisión digitales,

la tecnología Blockchain permite el registro de transacciones de forma similar a un sistema bancario, ofreciendo mayor seguridad y transparencia.

El sistema de registro es una base de datos de TI que asigna un número de serie único a cada unidad de una asignación y realiza un seguimiento de esos números de serie, desde su emisión en adelante. Esto incluye información sobre quién ha recibido los derechos de emisión, quién tiene esos derechos y otras unidades, además cuándo y de dónde se entregan o cancelan las unidades. Los participantes del mercado se registran y crean una cuenta donde se almacenan sus unidades (derechos de emisión).

El potencial de la tokenización en el registro para un SCE es claramente muy alto. Un token puede representar la asignación, la emisión o la reducción verificada de una tonelada de CO₂; y puede ser transferido a través de los participantes de la red Blockchain, garantizando el óptimo funcionamiento del SCE. Además de que al ser un token programable puede tener características especiales, propias de la tecnología.

En esto radica la importancia de la presente consultoría. Los próximos capítulos muestran cómo la tecnología Blockchain puede ser usada para el diseño de un SCE en Colombia, aportando beneficios adicionales sobre las tecnologías tradicionales de registro y transaccionales.

5. Metodología

El presente estudio es de tipo concluyente, en la medida en que sugiere un modelo o propuesta de modelo como solución a una problemática ya identificada. Se hace una revisión de la normatividad mundial y las disposiciones existentes en nuestro país, como condiciones previas para dar cumplimiento efectivo a los acuerdos suscritos por Colombia en la reducción de las cifras de emisiones de GEI, dentro del marco del calentamiento global.

Adicionalmente propone, a través de un modelo cuantitativo, **una aplicación bajo la tecnología Blockchain como plataforma transaccional y de registro de origen financiero**, que busca garantizar una mayor seguridad, accesibilidad, liquidez, trazabilidad y transparencia a la operación, incursionando de manera novedosa dentro de las tecnologías de la información y la comunicación, sin que ello implique que al momento de hacerse efectiva la comercialización de las unidades transables de carbono, sea la única opción existente.

El estudio realizado se basa en el enfoque de la teoría de sistemas y la metodología de marco lógico, como herramientas para facilitar el proceso de conceptualización, diseño, ejecución y evaluación de proyectos y estudios como sucede en la presente consultoría. El énfasis se centró en la orientación por objetivos, la orientación hacia grupos beneficiarios (Gobierno y empresas contaminantes) y poder facilitar la participación y la comunicación entre las partes interesadas.

La metodología se usará en todas las etapas del proyecto: la identificación y valoración de actividades que encajen en el marco de la identificación del problema, la preparación del diseño del proyecto de manera sistemática y lógica, la valoración del modelo del proyecto, la implementación y la evaluación del desempeño del mismo.

5.1. Enfoque de Sistemas

Esta teoría surgió con los trabajos del biólogo alemán Ludwing Von Bertalanffy, publicados entre 1950 y 1968. Ludwing afirma que las propiedades de los sistemas no pueden separar sus elementos, ya que la comprensión de un sistema se da sólo cuando se estudian globalmente, involucrando todas las interdependencias de sus partes (Ludwing, 1976).

Un sistema se define como un conjunto de elementos que guardan estrechas relaciones entre sí, que mantienen al sistema directa o indirectamente unido de modo más o menos estable y cuyo comportamiento global persigue, normalmente, algún tipo de objetivo (Chiavenato, 2007).

Características de los Sistemas

Sistema es un todo organizado y complejo, un conjunto o combinación de cosas o partes que forman un todo complejo o unitario. Es un conjunto de objetos unidos por alguna forma de interacción o interdependencia.

- Propósito u objetivo: Todo sistema tiene uno o algunos propósitos. Los elementos (u objetos), como también las relaciones, definen una distribución que trata siempre de alcanzar un objetivo.
- Globalismo o totalidad: Un cambio en una de las unidades del sistema, con probabilidad, producirá cambios en las otras. El efecto total se presenta como un ajuste a todo el sistema. Hay una relación de causa-efecto. De estos cambios y ajustes se derivan dos fenómenos: entropía y homeostasia.
- Entropía: Es la tendencia de los sistemas a desgastarse, a desintegrarse, para el relajamiento de los estándares y un aumento de la aleatoriedad. La entropía aumenta con el correr del tiempo. Si aumenta la información disminuye la entropía, pues la información es la base de la configuración y del orden.
- Homeostasis: Es el equilibrio dinámico entre las partes del sistema. Los sistemas tienen una tendencia a adaptarse, con el fin de alcanzar un equilibrio interno frente a los cambios externos del entorno.

Parámetros de los Sistemas

El sistema se caracteriza por ciertos parámetros. Los parámetros son constantes arbitrarias que se caracterizan por sus propiedades, el valor y la descripción dimensional de un sistema específico o de un componente del sistema.

Los parámetros de los sistemas son:

- Entrada, insumo o impulso (*input*): es la fuerza de arranque del sistema, que provee el material o la energía para la operación del sistema.
- Salida, producto o resultado (*output*): es la finalidad para la cual se reunieron elementos y relaciones del sistema. Los resultados de un proceso son las salidas, las cuales deben ser coherentes con el objetivo del sistema. Los resultados de los sistemas son finales, mientras que los resultados de los subsistemas son intermedios.

- Procesamiento o procesador o transformador (*throughput*): es el fenómeno que produce cambios, es el mecanismo de conversión de las entradas en salidas o resultados. Generalmente es representado como la caja negra, en la que entran los insumos y salen cosas diferentes, que son los productos.
- Retroacción, retroalimentación (*feedback*): es la función de retorno del sistema que tiende a comparar la salida con un criterio preestablecido, manteniéndola controlada dentro de aquel estándar o criterio.
- Ambiente: es el medio que envuelve externamente al sistema. Está en constante interacción con el sistema, ya que éste recibe entradas, las procesa y efectúa salidas. La supervivencia de un sistema depende de su capacidad de adaptarse, cambiar y responder a las exigencias y demandas del ambiente externo. Aunque el ambiente puede ser un recurso para el sistema, también puede ser una amenaza (Chiavenato, 2007).

Enfoque Sistémico

El enfoque sistémico de la metodología consiste en abordar el problema de estudio bajo las reglas de un sistema, es decir, manteniendo una perspectiva de sistemas, para determinar los elementos que lo componen y la relación existente entre ellos, así como sus entradas y salidas de información respecto al mundo exterior al sistema.

Este tipo de enfoque permite hacer una distinción entre lo general y lo particular, proponiendo así dos lecturas fundamentales:

- Estructural: Consistente en la identificación del interior del sistema, detallando sus componentes, su estructura y las funciones entre ellos.
- Integral: Consistente en la evaluación del funcionamiento del sistema y la pertinencia de sus elementos, evaluando aspectos como el rendimiento, la entropía y la efectividad.
- El conocimiento de la teoría general de sistemas y el enfoque sistémico es vital para el desarrollo de este trabajo, ya que garantiza mayor profundización en la revelación de las características estructurales y funcionales de los elementos, componentes, subsistemas, relaciones e interacciones que están presentes en el objeto de investigación.

5.2. Metodología de Marco Lógico

Esta metodología utilizada contempla un profundo análisis del problema, un análisis de los involucrados (personas naturales o jurídicas), jerarquía de objetivos (disgregación de los niveles del más al menos importante) y selección de una estrategia de implementación óptima (Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], 2015).

Con el uso de esta metodología se contemplaron dos etapas:

1) La identificación del problema y las alternativas de solución recomendadas, en las que se analiza la situación existente para crear una visión de la situación deseada y seleccionar las estrategias que se aplicarán para conseguirla.

2) La planificación, en la que la idea del modelo planteado se convierte en un plan operativo práctico para la ejecución. Entrando al detalle del análisis realizado, se definió como problema central “Crear un modelo transaccional sostenible para un Sistema de Comercio de Emisiones (SCE) en Colombia, soportado en la tecnología Blockchain”.

A partir de la definición de este importante tema se desarrollará todo un derrotero exigido por la metodología para la resolución óptima del modelo planteado. A continuación, se describen las etapas de la metodología de marco lógico.

Análisis de los Involucrados

Es muy importante este análisis, en el que se debe de incluir a cualquier persona o grupo, institución o empresa susceptible de tener algún tipo de vínculo con este modelo que se planteó. Para este caso, se extrajeron involucrados en su orden: Gobierno colombiano (emisor y/o regulador), proveedores tecnológicos, actores del mercado secundario, verificadores (auditor), Naciones Unidas, comunidad, administradores del mercado, sectores y empresas incluidas en el SCE y operadores de la plataforma diseñada en Blockchain.

Análisis del Problema

Es necesario identificar el problema que se desea intervenir, así como sus causas y sus efectos. Para el caso de esta tesis, se plantea la necesidad de contar con un modelo transaccional sostenible para un Sistema de Comercio de Emisiones (SCE) en Colombia soportado en tecnología Blockchain.

Análisis de Objetivos

Permite describir la situación futura a la que se desea llegar, una vez se ha resuelto el problema. Consiste en convertir los estados negativos del árbol de problemas en soluciones, expresadas en forma de estados positivos.

Selección de la Alternativa Óptima

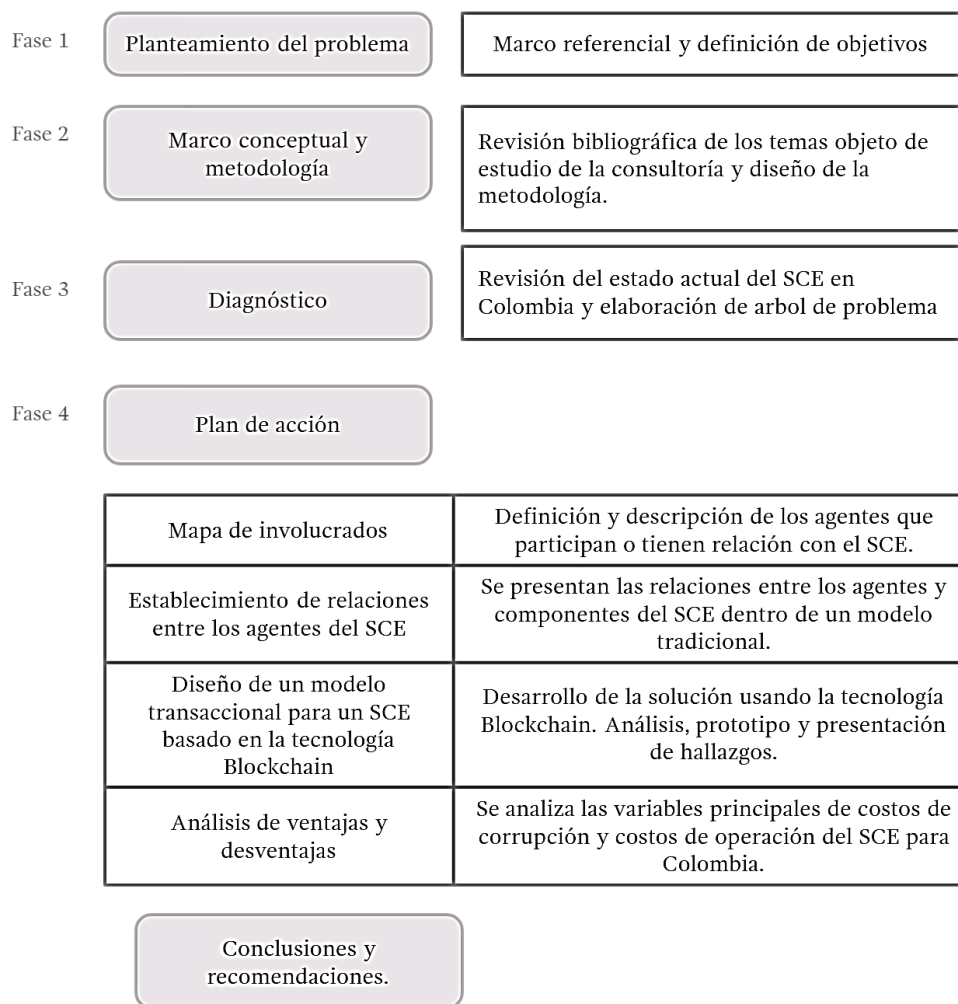
Este análisis consiste en la selección de la alternativa que se aplicó para alcanzar el objetivo planteado en la identificación del problema. Durante el análisis de alternativas o estrategias, se recomienda determinar los objetivos dentro de la intervención y los objetivos que quedarán fuera de la intervención. En este estudio se definió el diseño del SCE para Colombia soportado en la tecnología Blockchain.

5.3. Mapa de Ruta De Trabajo

Para el desarrollo de un SCE en Colombia es preciso incorporar los elementos normativos que regulan a la fecha el asunto, como punto inicial, generando la flexibilidad requerida en la programación, puesto que es un tema nuevo del cual probablemente se genere a futuro un tránsito legislativo importante. De esta forma, partiendo de un supuesto, se estructura tecnológicamente la parte transaccional basada en una red de distribución, mostrando ventajas y desventajas del modelo operacional en donde las etapas o la secuencia lógica se lleva a cabo de la siguiente manera:

Figura 3

Metodología de Trabajo



Nota. Elaboración propia.

En la fase 1 se realizó la identificación del problema y se plantearon los objetivos y alcance de la consultoría.

La fase 2 consistió en la investigación del marco conceptual para los temas Blockchain y Sistemas de Comercio de Emisiones. Se realizó un mapeo de los SCE en la experiencia internacional, específicamente el SCE de California y el SCE de la Unión Europea, donde se pudo identificar los principales elementos de diseño, variaciones o diferencias entre los mismos, para posteriormente analizar su aplicación para el caso colombiano. Las variables a tener en cuenta son los elementos estructurales del modelo, participantes, número de emisiones cubiertas,

empresas participantes, costos de implementación y operación, precios, número de asignaciones anuales, transacciones promedio y otras variables que dentro del desarrollo se consideraron relevantes. En la fase 3 se realizó el diagnóstico para el diseño actual del SCE en Colombia, de acuerdo con los estudios publicados a la fecha. Se plantearon los componentes de un SCE para Colombia, presentando los actores, funciones, relaciones, estructura, tecnología y demás variables importantes que deben tenerse en cuenta de acuerdo con el modo en que funcionan otros SCE a nivel global. Con esta información se proyectaron algunos supuestos con base en las características propias del SCE para Colombia, y así poder estimar costos operativos y transaccionales de la implementación y el funcionamiento del sistema.

Finalmente, en la fase 4 se realizó el mapa de involucrados y se establecieron las relaciones entre los agentes del SCE para culminar con el diseño del modelo transaccional para un SCE en Colombia basado en la tecnología Blockchain.

En esta fase se estudió la tecnología Blockchain y su aplicación en los SCE, identificando los principales aspectos a tener en cuenta en la implementación de una solución que utiliza la tecnología Blockchain en un SCE. Se analizaron todas las variables que se deben tener en cuenta al momento de implementar esta tecnología y las consideraciones de diseño y elección del tipo de tecnología adecuada, de acuerdo con las necesidades propias de un SCE.

En el diseño del sistema transaccional se procedió a describir y simular el SCE bajo la tecnología en mención, describiendo su influencia y las transformaciones que se obtendrían a través de su uso. De igual forma, el análisis comprendió las nuevas relaciones entre los agentes, las funciones y las condiciones del modelo, acordes con los requerimientos de esta tecnología. Se aplicaron los supuestos que a la fecha se consideraron pertinentes, para hacer las estimaciones de costos y efectividad del modelo, bajo la nueva tecnología.

Se realizó la validación y ajustes necesarios para efectuar la modelación respectiva que permita determinar las bondades del sistema transaccional para un SCE en Colombia bajo esta nueva tecnología. Para esto, se efectuó un estudio tomando las siguientes variables de SCE reconocidos alrededor del mundo:

- Cantidad de emisiones anuales (oferta).

- Los participantes: Incluye tanto los participantes por parte del gobierno y las entidades regulatorias y de control, como las empresas y/o particulares que se deban integrar al sistema.
- Costos y gastos de operación: Incluye los costos del mantenimiento de la plataforma, costos de personal necesarios para la operación y todos los gastos que se generen por la implementación del sistema.

Finalmente, se analizan ventajas y desventajas del modelo tradicional vs. el modelo Blockchain en el diseño de un modelo transaccional para un Sistema de Comercio de Emisiones. Adicionalmente se elaboran las conclusiones y recomendaciones con los hallazgos obtenidos durante el trabajo y se presenta el informe de consultoría a la empresa XM.

6. Diagnóstico

Para el diagnóstico se realiza un análisis del problema, partiendo de lo general a lo particular. En éste se muestran los efectos y las causas analizadas, con el fin de identificar ampliamente el problema y desarrollar alternativas de solución pertinentes. Además, se presenta el estado actual del desarrollo del SCE para Colombia, de acuerdo con el mapa de ruta desarrollado por el Gobierno Nacional de Colombia y estudios realizados por empresas consultoras especializadas.

Debido a los altos niveles de la temperatura del planeta y al incremento de la concentración de CO₂ en la atmósfera que conllevan al detrimento de la vida en la Tierra, los grandes líderes políticos mundiales, reunidos en París en 2015, llegaron a un acuerdo para implementar la reducción gradual de las emisiones de CO₂, con carácter obligatorio para cada uno de los países participantes. De acuerdo con el tratado de París, Colombia adquirió el compromiso, para el año 2030, de alcanzar niveles de reducción del 51%. Para ello, el Gobierno Nacional viene explorando diferentes instrumentos que le permitan alcanzar los compromisos adquiridos, tales como el impuesto al carbono ya implementado y el desarrollo de un SCE, también denominado Programa Nacional de Cupos Transables de Emisión -PNCTE-.

6.1. Árbol de Problemas General

El objeto de esta consultoría empresarial es el desarrollo de una solución viable a un problema que tiene fuertes repercusiones a nivel global. Se trata del calentamiento global debido a los altos niveles de CO₂ en la atmósfera, lo cual, como se ilustra en la siguiente figura, tiene unos efectos y unas causas que lo originan. Dentro de los efectos principales se destacan los cambios en la temperatura y sus consecuencias en los ecosistemas, al igual que los desastres naturales y la pérdida de fauna y flora. Esto también ha generado alertas en los países que han creado controles ambientales y que buscan generar un crecimiento y desarrollo sostenible.

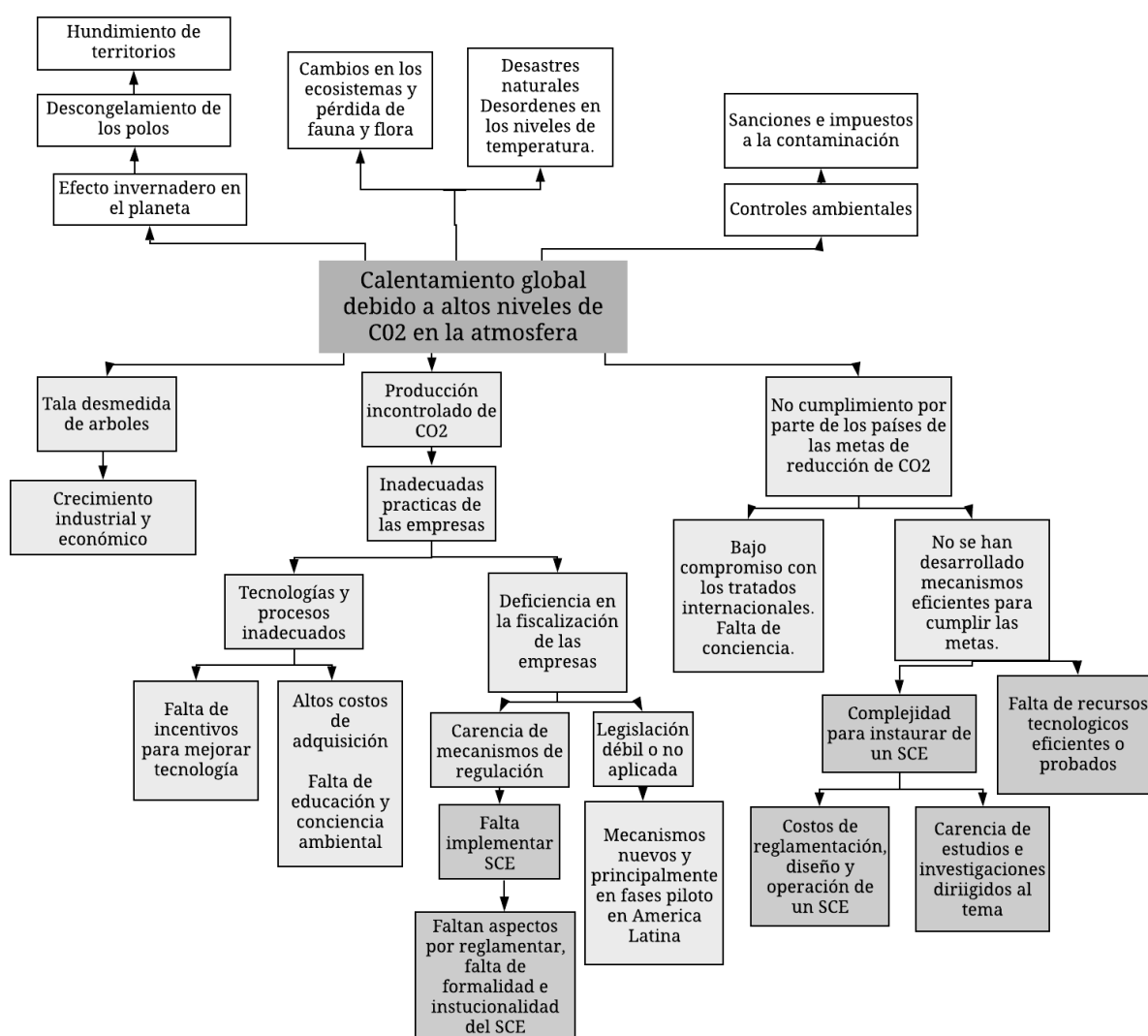
Analizando las causas de los altos niveles de CO₂ en la atmósfera, se evidencia que hay una desmedida emisión por parte de empresas y personas, debido principalmente a inadecuadas prácticas y al uso de tecnologías y procesos poco amigables con el medio ambiente. Por una parte, esto se presenta debido a los altos costos de las tecnologías limpias y los pocos incentivos arancelarios que tienen las empresas para adquirirlas; además, la falta general de conciencia

ambiental en los empresarios. También se debe a que no existen mecanismos efectivos para la fiscalización de las empresas, pues no se han diseñado los instrumentos o la legislación se encuentra en fase de implementación, como es el caso del SCE en algunos países.

La Figura 5, presenta el árbol de problemas general donde se aborda el calentamiento global con sus principales causas y sus principales efectos.

Figura 4

Árbol de problemas general

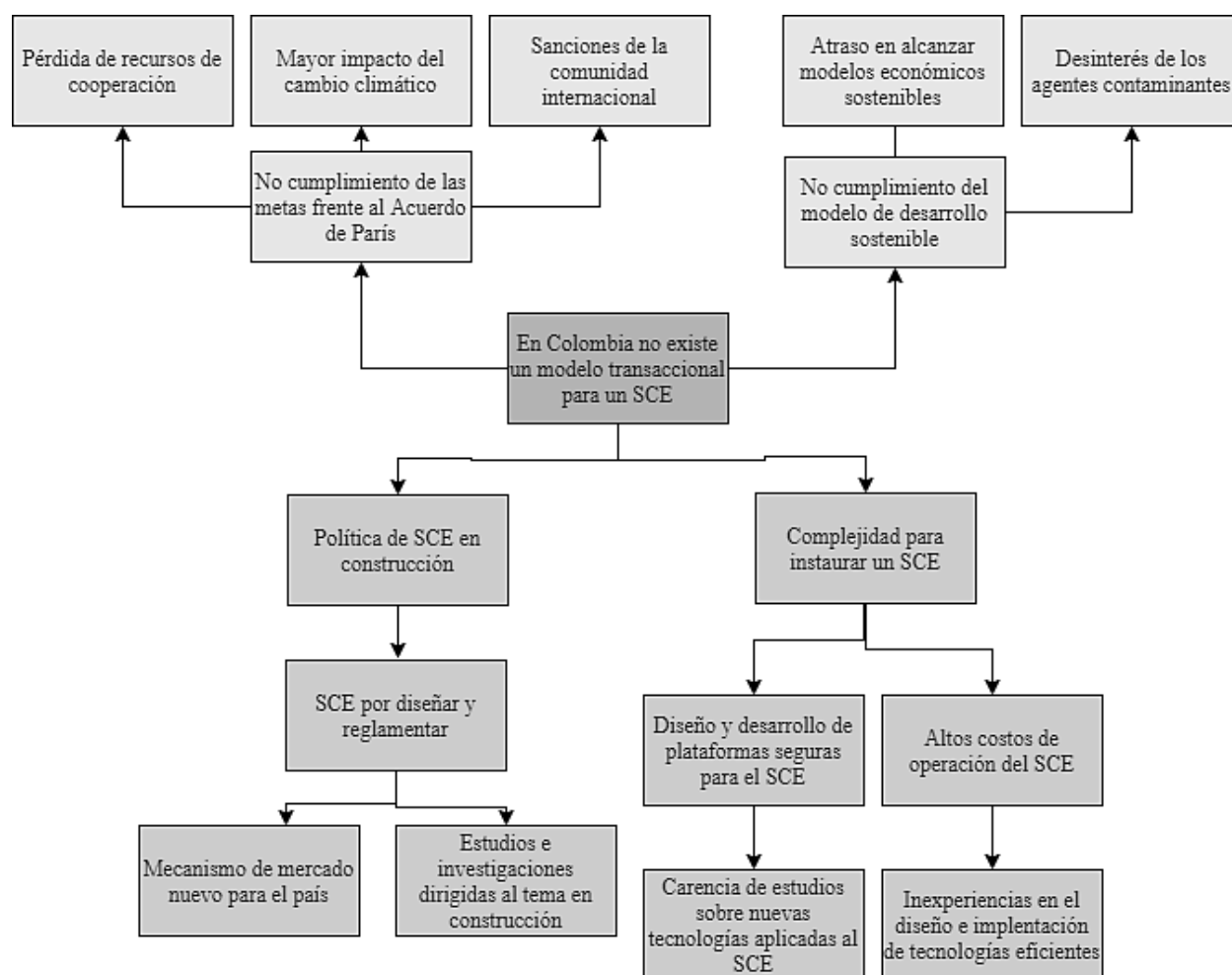


Nota. Elaboración propia.

En la Figura 6, partiendo de la problemática general hacia los problemas específicos, que en última instancia son el objeto de estudio de esta consultoría, se infiere que actualmente en Colombia no se ha diseñado una plataforma que permita desarrollar un modelo transaccional para un SCE. Se evidencia que hay una dificultad para instaurar el SCE, debido a la complejidad en la planeación, diseño e implementación de este mecanismo, al igual que los altos costos que se generan y la falta de estudios e investigaciones relacionados con el tema, la poca experiencia que se tiene por tratarse de un mercado emergente y la carencia de soluciones y tecnologías probadas que ayuden a su implementación.

Figura 5

Árbol de problemas específico



Nota. Elaboración propia.

Los países firmantes del Acuerdo de París establecieron unas metas de reducción para sus emisiones de CO₂. Para el cumplimiento de estas metas los países deben desarrollar políticas e instrumentos, tales como el SCE, que le ayuden a la consecución de sus objetivos. Las metas de reducción han venido aumentando y los estados han venido trabajando de la mano de analistas privados en los diseños de los SCE que se ajusten de mejor manera a sus necesidades y particularidades.

Actualmente, en Colombia se han realizado estudios e investigaciones para el diseño de un modelo de lo que debería ser el SCE en el país, trabajo que se ha venido realizando desde el año 2016 por el Ministerio de Medio Ambiente, el Departamento Nacional de Planeación, el Ministerio de Hacienda y otros actores como el Banco Mundial y empresas de consultoría MOTU¹⁶. Estos avances técnicos han sido complementados con cambios legales y regulatorios dentro de los cuales se debe enfatizar la aprobación de la Ley 1819 de 2016, mediante la cual se creó el impuesto al carbono; el establecimiento de un mecanismo de no causación del impuesto al carbono (Decreto 926 de 2017); la regulación del Sistema de Monitoreo, Informe y Sistema de Verificación (Resolución 1447 de 2018); y la Ley 1931 de 2018, que proporciona la base jurídica para el SCE de Colombia, el Programa Nacional de Cupos Transables de Emisión de Gases a Efecto Invernadero -PNCTE-.

A la fecha, el Gobierno Nacional cuenta con estudios sobre los principales aspectos técnicos de diseño del PNCTE. Según la información pública, el análisis y las discusiones se han centrado en cuatro áreas y 11 decisiones. Estas áreas son: i) creación de mercado; ii) operación del mercado; iii) decisiones más allá del ETS y iv) gobernanza (Banco Mundial, 2020).

En términos de creación de mercado, existen consultorías que han avanzado en la definición del ámbito de aplicación, el CAP o límites de emisión y decisiones sobre el uso de compensaciones. El ámbito de aplicación incluye los sectores y gases, puntos de regulación para cada sector y un posible umbral de emisiones de GEI. Dependiendo de los datos disponibles y el potencial de mitigación de los sectores, el Gobierno puede considerar que algunos sectores sean parte del PNCTE en la fase 1 y otros en la fase 2. En cuanto al límite de emisión, el equipo

¹⁶ Motu es el principal instituto de investigación económica de Nueva Zelanda. Se encuentra entre los diez mejores *think tanks* económicos mundiales y los diez mejores *think tanks* climáticos.

técnico está trabajando en establecer el límite, de acuerdo con los datos históricos y los objetivos de reducción a largo plazo de país. El país ha estudiado el impacto del uso de compensaciones y las fuentes que podrían generarlos (por sectores y tipo de proyectos).

Acercas de la operación del mercado, los avances se han concentrado en la distribución de los derechos de emisión, la estabilidad de precios y los mecanismos de flexibilidad. Los estudios consideran las subastas como un mecanismo para distribuir las asignaciones, ya que preservan los incentivos para una reducción rentable y aumentan los ingresos. También se ha analizado la opción de otorgar derechos gratuitos, según la necesidad de reducir el riesgo de fuga de carbono o pérdida de competitividad de algunos sectores y gestionar la transición hacia el SCE. Los expertos también han evaluado diferentes mecanismos para gestionar el riesgo de variabilidad de precios, incluido el precio máximo, el precio mínimo y su relevancia para el nuevo mercado colombiano. Sobre los mecanismos de flexibilidad, el equipo técnico ha analizado los pros y los contras del *banking* y los préstamos entre períodos (flexibilidad temporal), al igual que se ha enfocado en el diseño del mercado secundario como una herramienta que permite comprar asignaciones a los agentes, en cualquier momento del período de cumplimiento.

En cuanto a las decisiones más allá del SCE se analiza la interrelación del impuesto al carbono con el futuro PNCTE y se determina la relevancia de desarrollar, antes de la fase 1 del PNCTE, el sistema de monitoreo, reporte y verificación. Algunas tareas por realizar para su implementación son la regulación para el monitoreo y la presentación de informes, la definición de las metodologías para monitorear las emisiones de GEI y la generación de plantillas para planes de monitoreo.

El Gobierno también ha emprendido esfuerzos para establecer la gobernanza del SCE. Para ello han sido estudiados temas como el marco institucional y el régimen de sanciones. Bajo el marco institucional se identificaron las posibles entidades públicas y privadas que estarían a cargo de implementar los diferentes aspectos del PNCTE. Para el régimen de sanciones basado en la ley de cambio climático, el Gobierno ha progresado en la creación de un proyecto de régimen de sanciones que garantiza el cumplimiento de los agentes regulados. Este régimen consideraría sanciones económicas e implicaciones reputacionales del incumplimiento, dependiendo de la falta.

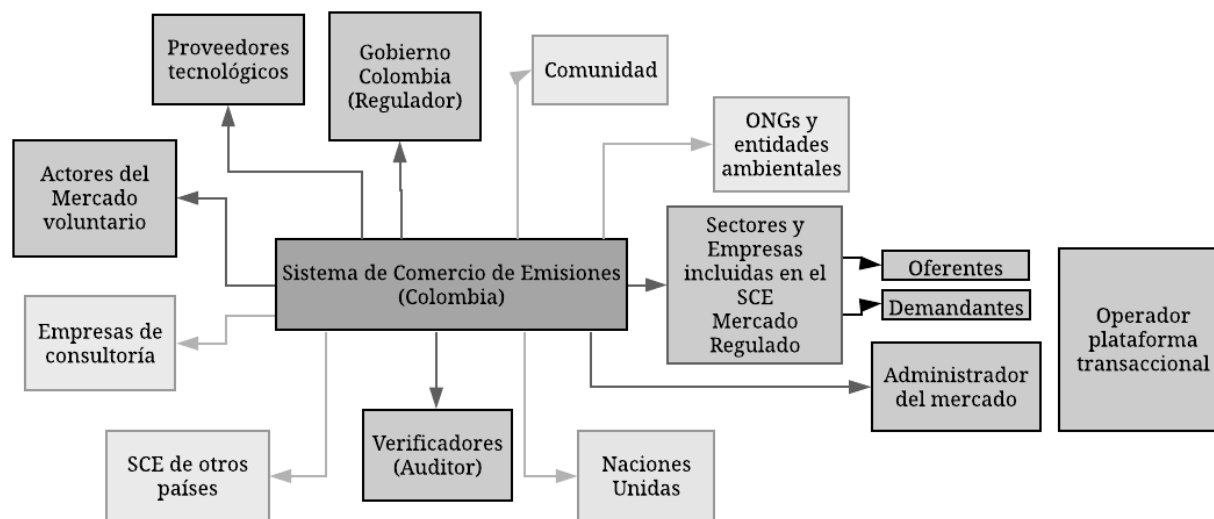
7. Plan de Acción

7.1. Mapa de Involucrados

A continuación, la Figura 7 presenta la construcción del mapa de involucrados, donde aparecen los agentes que participan o tienen relación con el SCE, ya sean personas, instituciones, empresas u organizaciones tanto públicas como privadas. Este análisis implica la identificación de aquellos agentes que pueden tener una participación directa o indirecta, investigando sus roles, actividades, capacidad de participación e incidencia dentro del funcionamiento del SCE.

Figura 6

Mapa de Involucrados



Nota. Elaboración propia.

Se establecen dos grupos de involucrados en un SCE. En primer lugar, se tienen los agentes directos que operan en el sistema, entre ellos está el Gobierno, las empresas incluidas en el SCE, el administrador del mercado, los verificadores, los actores del mercado voluntario y los proveedores tecnológicos. En segundo lugar, se tienen agentes que se ven afectados o pudieran estar interesados en el SCE, sin embargo, no están necesaria o directamente involucrados. En este grupo se encuentran las empresas de consultoría, Organizaciones No Gubernamentales, Naciones Unidas, SCE de otros países y la comunidad en general.

Involucrados Directos

Gobierno. Es la máxima autoridad, quien instituye los fundamentos legales y diseña los elementos necesarios para el diseño y operación del SCE. El Gobierno establece las bases de funcionamiento del SCE, desde el establecimiento de las metas de reducción hasta la definición de las sanciones para las empresas de los sectores incluidos en el SCE que no cumplan sus objetivos. Esto incluye la definición de cada uno de los pasos que se deben contemplar para el diseño y estructuración del SCE, a los cuales se hace referencia en el marco conceptual del presente documento, y la cantidad de cupos a emitir de acuerdo con las metas de reducción. En el caso de Colombia, las entidades involucradas son principalmente el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, Departamento Nacional de Planeación y Ministerio de Hacienda y Crédito Público.

Empresas incluidas en el SCE. Se refiere a cada una de las empresas o instalaciones reguladas por el SCE. Son las empresas responsables de realizar sus reportes de emisión ante el Gobierno y los verificadores. Al final de cada año deben contar con una cantidad de derechos de emisión igual o superior a las emisiones informadas en sus reportes. Para ello, pueden participar en el mercado primario y/o secundario para la adquisición de derechos de emisión de acuerdo con sus intereses y necesidades. Según los informes de consultoría disponibles hasta el momento, los sectores propuestos para el SCE incluyen el sector energético, procesos industriales y emisiones fugitivas, así como el sector de residuos. Se contempla integrar los sectores agrícola y forestal para generar certificados de carbono. Dependiendo de los datos disponibles y el potencial de mitigación de los sectores, el Gobierno considera que algunos sectores serán parte del PNCTE en la fase 1 y otros en la fase 2.

Administrador del mercado. Es la entidad o institución asignada por el Gobierno para administrar las subastas y transacciones del mercado. Ofrece los servicios de la plataforma transaccional, facilitando la liquidez del mercado y la interacción entre los agentes del mercado.

Verificadores. Son las organizaciones avaladas por el Gobierno para efectuar la revisión y aprobación de los reportes de emisión generados por las empresas. Cada empresa participante prepara su reporte y lo presenta ante un verificador, quien con capacidad técnica y experiencia determina la validez de este y emite un concepto aprobatorio para que dicho reporte sea válido ante el Gobierno. El Gobierno toma en cuenta estos reportes para comprobar el cumplimiento de

las empresas en el sistema. Los verificadores deben estar acreditados para ejercer estas funciones.

Actores del mercado voluntario. Se refiere a las iniciativas del mercado no regulado o voluntario, cuyos propietarios pueden vender compensaciones a empresas participantes del SCE. Las compensaciones (*offsets*) son reducciones de emisiones, desarrolladas bajo protocolos específicos, que se originan en proyectos de sectores que no están cubiertos por el SCE. De acuerdo con las características de diseño del SCE, las compensaciones pueden utilizarse para cumplir con las obligaciones de reducción, siendo una fuente adicional a los permisos de derechos de emisión. Cada certificado de carbono representa una reducción equivalente a un derecho de emisión. Dentro los actores del mercado voluntario también se encuentran los programas de certificación de carbono, los organismos de validación y verificación y las empresas de consultoría y desarrollo de proyectos.

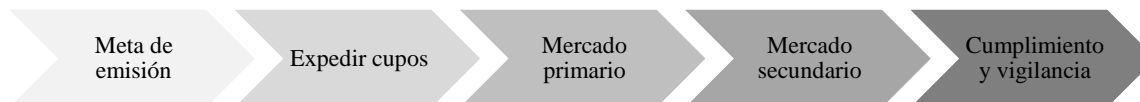
Proveedores tecnológicos. Un SCE es un instrumento de mercado implementado por el Gobierno para controlar las emisiones de GEI. Dicho instrumento requiere de una plataforma de registro de unidades, bien sean cupos, certificados de carbono o emisiones de CO₂e. Esta plataforma permite llevar la trazabilidad de la información y las transacciones de forma segura y transparente, de forma que se pueda reconocer qué entidades reguladas cumplen o no el límite de emisiones. Para su funcionamiento, se requiere de una plataforma o estructura tecnológica que permita gestionar los procesos y actividades del SCE de manera eficiente. Esta plataforma puede ser diseñada, desarrollada y operada por el Gobierno, por un tercero o conjuntamente.

7.2. Relación entre Agentes

Como se ha mencionado, un SCE está conformado por una estructura operativa y unos agentes con diferentes propósitos que interactúan entre sí para cumplir el objetivo: la reducción efectiva de la cantidad de CO₂ emitida a la atmósfera.

En la siguiente figura se resume el funcionamiento de un SCE. Se parte de la definición de una meta de reducción o límite por parte del Gobierno y posteriormente se expide esa misma cantidad de cupos que se entregan a las empresas por medio de subasta o asignación gratuita, constituyendo así el mercado primario. Posteriormente, las empresas pueden tranzar entre sí sus derechos de emisión en lo que se puede denominar un mercado secundario y al final de cada

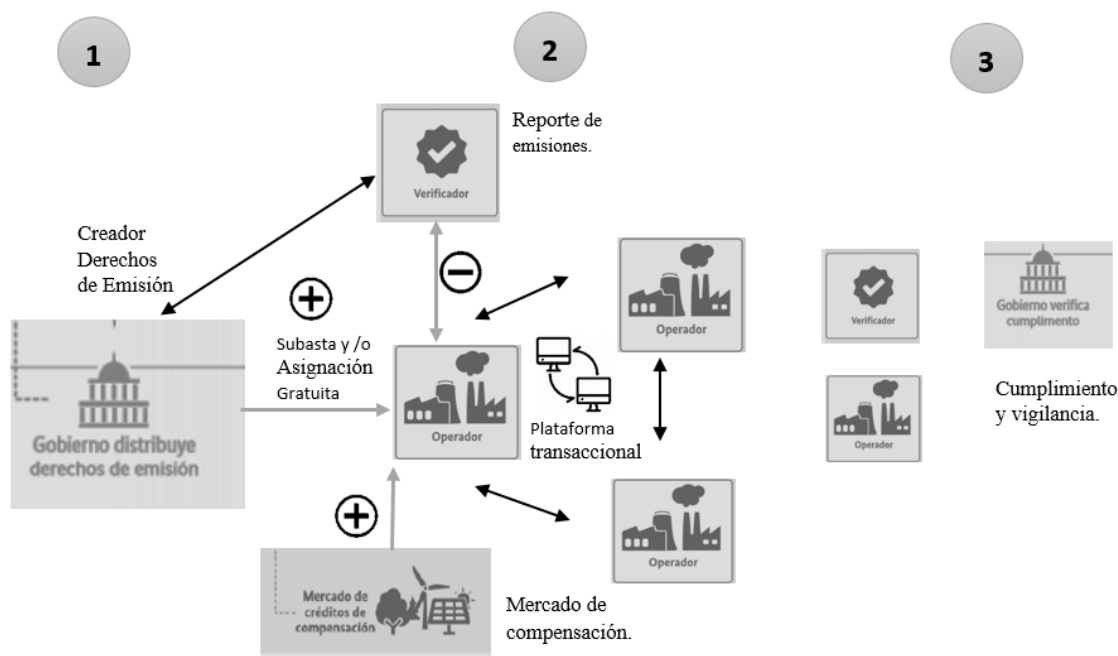
periodo (año) las empresas realizan sus reportes de emisión y los presentan ante el Gobierno, para cerrar con el último paso del sistema, que es el cumplimiento y vigilancia de sus límites de emisión.



La Figura 8 muestra el funcionamiento del SCE, en donde se muestran los agentes directos que conforman el sistema y el modelo de funcionamiento del mismo.

Figura 7

Funcionamiento del SCE tradicional



Nota. Elaboración propia.

1) De acuerdo con las metas de emisión, el Gobierno determina la cantidad anual de derechos de emisión a entregar durante un año. Estos derechos son otorgados a las empresas directamente, a través del mecanismo que se haya establecido (subasta o asignación gratuita). Cada empresa que participe en la subasta recibe los derechos de emisión y los puede guardar o tranzar en cualquier momento. Estos derechos se representan con un símbolo (+) y denotan un derecho de emisión equivalente a una tonelada de CO₂.

2) Las empresas deben reportar anualmente al Gobierno las emisiones de sus actividades empresariales. Para ello, cada empresa genera reportes de emisión que son supervisados y auditados por un ente verificador, el cual avala y garantiza la correcta medición del CO₂. De acuerdo con el reporte de la empresa, ésta recibe créditos de emisión que se representan con un símbolo (-). Estos créditos denotan las toneladas de CO₂ verificadas que han sido emitidas al medio ambiente por la empresa. Para la generación del reporte de emisión se requiere la intervención de la empresa, el verificador y el regulador, como instancia final de vigilancia. Dichos créditos se compensan con los derechos de emisión o certificados de carbono que posea la empresa (un crédito de emisión se compensa con un derecho de emisión o certificado de carbono). Las empresas pueden comercializar entre ellas derechos de emisión o certificados de carbono en mercados transaccionales o mercados OTC, de acuerdo con sus necesidades. A su vez, el Gobierno puede intervenir el mercado comprando o vendiendo derechos de emisión para estabilizar el precio, de acuerdo con las políticas definidas.

Como se ha enunciado, es posible que certificados de carbono del mercado voluntario puedan ingresar en forma de derechos de emisión al SCE y ser utilizados por las empresas para compensar sus emisiones. Para ello se requerirá la aprobación del verificador y el regulador.

3) Al final del periodo, cada empresa posee un saldo final de derechos, certificados o emisiones, reflejado en el registro. También se conocen las transacciones donde se muestran las entradas y salidas de derechos de emisión, al igual que los reportes de emisiones. Esta información es la que usa el regulador para determinar si las empresas cumplieron sus objetivos de compensación y si tienen saldos de derechos de emisión a favor o en contra. Con ello se puede establecer las respectivas sanciones y/o beneficios.

7.3. Modelo Transaccional para un SCE basado en la Tecnología Blockchain

Anteriormente se ha realizado la descripción de los componentes y funcionamiento de un SCE tradicional. A continuación, se hace la descripción de este modelo propuesto para Colombia usando la tecnología Blockchain.

La plataforma transaccional propuesta contempla las actividades de:

- Mercado primario (creación de derechos de emisión (CAP o límite)).
- Distribución de tokens hacia las billeteras de los participantes (subastas).

- Mercado secundario (*exchange* descentralizado y mercado OTC entre los participantes).
- Reportes de emisión (presentación y aprobación o rechazo).
- Inclusión de certificados de carbono del mercado voluntario.
- Monitoreo de transacciones, seguimiento de derechos de emisión y cumplimiento de metas de reducción.
- Interoperabilidad entre SCE.
- Contabilidad, trazabilidad, compensación de derechos de emisión con mediciones de CO2 reportadas por las empresas.

Consideraciones

- Al existir varias plataformas Blockchain se debe elegir una sola para la programación y simulación del sistema. En este caso, a criterio de los consultores y expertos en Blockchain, se decide usar la plataforma pública llamada Ethereum. Este mismo modelo se podría llevar a otras redes de Blockchain, bien sean públicas o privadas.
- La simulación del SCE para Colombia usando la tecnología Blockchain tiene en cuenta la información de diseño que hasta el momento se tiene disponible para el país y las guías de diseño internacionales. Los elementos no conocidos se toman como supuestos.
- El modelo construido en la red Ethereum está compuesto por diferentes contratos inteligentes con funcionalidades básicas que no tienen en cuenta todos los aspectos que tendría un SCE real. Se hace con fines descriptivos para representar cómo la tecnología Blockchain puede ser útil para el diseño de un SCE en Colombia.

Definiciones

Billetera Digital. El término *wallet* hace referencia a una cartera, billetera o monedero virtual en el que se puede gestionar criptoactivos. Es un software o hardware diseñado exclusivamente para almacenar y gestionar las claves públicas y claves privadas del activo digital.

La Llave Criptográfica. Asocia la identidad de una persona, empresa o de un equipo informático, a un contrato inteligente. Se trata de un sistema criptográfico que genera para sus usuarios, mediante la aplicación de algoritmos específicos, dos “claves” o “llaves”: una pública, que puede ser distribuida a cualquiera y sin riesgo, y otra privada, que sólo debe ser conocida por

su dueño. Estas “llaves” son líneas alfanuméricas de determinada extensión. Utilizando este sistema, la persona remitente puede cifrar cualquier mensaje usando la llave pública del destinatario. Una vez ese mensaje esté cifrado con esa llave pública, sólo la llave privada de ese receptor puede descifrarlo, pues ambas están relacionadas matemáticamente. En este sentido, la clave pública puede ser comparada con una dirección de correo electrónico, mientras que la privada sería la contraseña de ese correo. El principal beneficio de la llave criptográfica es garantizar integridad, autenticidad y autoría.

Token ERC20. Es un *smart contract* que cuenta con una estructura de datos ya preestablecida. Esta estructura está pensada para facilitar la implementación de diversas funcionalidades sobre la Blockchain de Ethereum, facilitando el trabajo de creación, transacción y control de los contratos. Las siglas ERC significan *Ethereum Requests for Comments* o Solicitud de Comentarios para Ethereum, mientras el número 20 proviene del EIP donde se describe. Este es un estándar común para crear tokens en la cadena de bloques Ethereum. Este estándar de tokens define un conjunto de reglas que se aplican a todos los tokens ERC20 y que permiten interactuar sin problemas entre sí.

Contrato Inteligente. Los *smart contracts* o contratos inteligentes se refieren a cualquier acuerdo que se formalice mediante scripts o códigos de computador para formalizar cláusulas. Una vez finalizado este acuerdo y se produzca un evento desencadenante, la producción de eventos programados se ejecuta automáticamente sin que quepa modificación o bloqueo.

Sistema de Comercio de Emisiones usando la tecnología Blockchain. El SCE planteado consiste en el desarrollo de un token ERC20 en la red Ethereum y dos contratos inteligentes, uno para determinar las condiciones de funcionamiento y gobernanza del sistema y el otro para la presentación de los reportes de emisión.

Aunque los contratos están programados en una red pública, tiene ciertas condiciones para que el Gobierno, como ente regulador, pueda administrarlo y conceder diferentes permisos y restricciones a los participantes. Este control de accesos se da a través de la configuración de las llaves criptográficas, con las cuales el Gobierno actúa.

El Gobierno u operador es quién despliega los contratos inteligentes en la red. Los derechos de emisión están representados por tokens ERC20 que pueden transferirse y

almacenarse por cada una de las empresas participantes en cualquier billetera virtual que soporte este estándar del token.

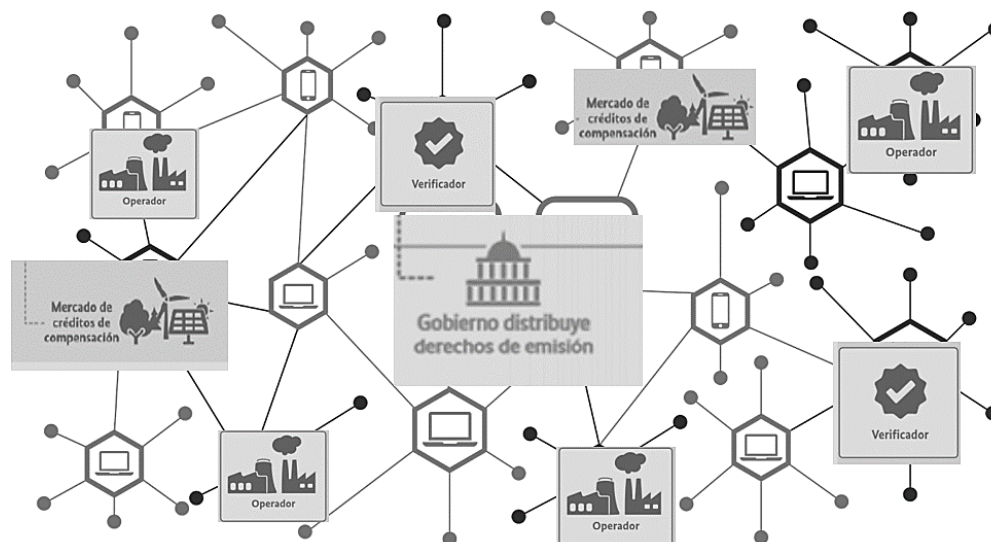
Las empresas y los verificadores crean sus billeteras digitales, que deben ser aprobadas con anterioridad por el Gobierno o administrador para poder realizar transacciones dentro de la red. Las empresas pueden recibir y enviar derechos de emisión y subir sus reportes dentro de la misma red. Los verificadores aprueban los reportes de emisión de las empresas a través de la red.

Dentro de la red existen derechos de emisión que representan el derecho para contaminar una tonelada de CO₂, en la red son tokens ERC20. También se tiene créditos de emisión que representan toneladas de CO₂ emitidas por las empresas y que se compensan uno a uno con los derechos de emisión. No existe un token para representar los créditos de emisión, existe un contrato inteligente por medio del cual las empresas presentan sus reportes de emisión, indicando la cantidad contaminada. Una vez que el reporte es aprobado, la empresa puede enviar derechos de emisión al contrato del reporte y estos son destruidos automáticamente haciendo la función de compensación de los créditos de emisión reportados.

La Figura 9 muestra un SCE para Colombia usando la tecnología Blockchain. Se identifican los agentes principales y sus relaciones a través de una red descentralizada.

Figura 8

Funcionamiento del SCE con Blockchain



Nota. Elaboración propia.

Los diferentes miembros están conectados entre sí a través de una red descentralizada y pueden interactuar en la red usando sus billeteras digitales y llaves criptográficas para enviar y recibir derechos de emisión o realizar reportes. Todas las condiciones de funcionamiento y gobernanza de la red están definidas por el contrato inteligente, que una vez desplegado en la red se vuelve inalterable y seguro contra todo tipo de corrupción.

En la red se llevan a cabo las actividades esenciales de un SCE, tales como creación de derechos de emisión (mercado primario), transacciones de compra y venta entre los participantes (mercado secundario), presentación de reportes de emisión usando el contrato inteligente y la red de archivos descentralizada pública, compensación y liquidación de derechos de emisión, cumplimiento y vigilancia, vinculación con otros SCE y se puede permitir el uso de compensaciones. A continuación, se detalla dicho funcionamiento.

1) El Gobierno u operador crea una billetera y despliega los contratos en la red. En el caso de la red Ethereum, debe poseer una cantidad de ETH para cubrir el costo de despliegue de los contratos. Una vez los contratos se encuentran activos, el Gobierno puede crear tokens que representan los derechos de emisión. Sólo el Gobierno (emisor) puede crearlos. El Gobierno tiene la facultad de aprobar quiénes participan en la red, tanto si son empresas o verificadores a través del registro de las llaves públicas de estos participantes.

2) Cada empresa y cada verificador debe crear una billetera digital en la red Ethereum. Con el fin de que las empresas y los comerciantes puedan participar en el sistema, cada uno debe llenar una aplicación y proporcionar información al regulador en un proceso ampliamente conocido como KYC (*Know-your-customer*) o debida diligencia. Este proceso asegura que las leyes contra la financiación del terrorismo y lavado de activos no sean violadas.

Al mismo tiempo, debe informar la llave pública de su billetera para que el Gobierno u operador registre la información y apruebe la participación de la empresa o verificador dentro de la red. Sin esta aprobación, no podrán realizar transacciones o reportes ni validar los reportes. Las empresas y los verificadores contarán con una interfaz de usuario para conectarse a la red Ethereum y ejecutar las funcionalidades de reportar y validar reportes de créditos de emisión.

3) El Gobierno u operador realiza subastas periódicas de acuerdo con la legislación y las empresas pueden participar de estas. Puede enviar los derechos de emisión creados a las empresas, a través de una transacción instantánea en la red Ethereum. Las empresas pueden

guardar estos derechos de emisión en sus billeteras, usarlos para compensar sus créditos de emisión o realizar transacciones en la red de acuerdo con las necesidades de compra y venta.

4) Las empresas realizan sus mediciones de contaminación y presentan reportes de emisión en un formato previamente establecido. Este documento se carga por las empresas en una red pública de archivos descentralizada para que el reporte sea públicamente verificable y no pueda ser alterado. Este documento será identificado por un *hash*. Luego se realiza una transacción de reporte de emisión en la red de Ethereum, que registra este *hash* con la cantidad reportada de créditos de emisión. Este reporte es verificado y aprobado por un verificador. Una vez aprobado tanto por el verificador como por el Gobierno, la empresa puede destruir sus derechos de emisión que compensen la misma cantidad de créditos de emisión reportados y así cumplir la normatividad. Si el reporte llegara a presentar errores, inconsistencias o es rechazado por el verificador, las empresas tienen la posibilidad de actualizar o editar el reporte nuevamente. Todos los eventos de ajuste quedan registrados en la red pública para una mejor trazabilidad.

Un hecho crítico con cualquier solución Blockchain es su interfaz con el mundo real. La máxima “basura entra, basura sale” acertadamente ilustra las consecuencias de datos de entrada deficientes o imprecisos. Se aclara que la plataforma solo contempla la presentación del reporte y no toma en cuenta la información contenida ni los procesos asociados a las mediciones. La información debe ser monitoreada y garantizada por el verificador de acuerdo con los protocolos y metodologías definidas por el regulador.

5) Los verificadores son organizaciones particulares reconocidas y certificadas para la actividad que desempeñan de revisar y aprobar reportes de emisión de las empresas. Para ello, solo deben usar su llave privada para firmar una transacción en que se especifica la dirección de contrato del reporte a aprobar. Una vez la transacción de reporte es aprobada por el verificador, el Gobierno debe a su vez firmar la transacción, y de esta manera la empresa ya puede, a través de una transacción, pagar sus créditos de emisión compensándolos con los derechos de emisión que posea.

6) La plataforma Blockchain permite registrar ofertas y demandas de derechos de emisión, así las empresas pueden realizar operaciones en el mercado secundario de forma transparente, fácil y segura. Este libro de órdenes funciona como un intercambio descentralizado, eliminando la necesidad de tener intermediarios y administradores de una casa de cambio. Se

puede asegurar la entrega vs. pago, a través de transacciones atómicas en la red, eliminando cualquier riesgo de contraparte. Para los pagos se contempla la posibilidad de incluir un token que represente unidades de pesos colombianos, el cual podría ser emitido y controlado por una entidad financiera que pueda ser participante del SCE. De este modo, los pagos y entregas de los derechos de emisión podrían ser automatizados con Blockchain y el uso de los contratos inteligentes.

7) Certificados de carbono del mercado secundario pueden ser utilizados por las empresas como mecanismo para compensar sus créditos de emisión. Para ello, existe un tipo de transacción por medio de la cual las empresas informan la cantidad, el origen y la veracidad de los certificados de carbono. Esta información es validada por el verificador y por el Gobierno. Una vez aprobada, el Gobierno emite una cantidad de derechos de emisión equivalente a los certificados adquiridos por la empresa y los transfiere a la billetera de la misma, por medio de una transacción en la red. Con este sistema se puede siempre validar el origen de los certificados del mercado voluntario que ingresan al SCE para ser compensados con créditos de emisión, manteniendo la transparencia y trazabilidad del proceso de una manera pública.

8) El Gobierno cuenta con una aplicación para el monitoreo y control de las cuentas de las empresas contaminantes. De esta manera puede tener acceso en línea a los movimientos de los derechos de emisión entre las empresas. Igualmente puede rastrear los reportes de emisión y tener datos en tiempo real del cumplimiento o no de las metas de reducción por parte de las empresas.

9) La red permite considerar la interoperabilidad a nivel mundial entre SCE. El Gobierno puede agregar tokens de derechos de emisión de otros países que pueden ser aceptados para compensar los créditos de emisión reportados por las empresas.

7.4. Prototipo SCE Usando Tecnología Blockchain

Con el apoyo de un experto en desarrollo Blockchain, se llevó a cabo un prototipo del SCE para Colombia usando la Blockchain de Ethereum y la red de prueba Ropsten. Los enlaces para acceder al contenido son los siguientes:

1) <https://github.com/SCE-Blockchain/sce-colombia>

Repositorio donde se encuentra el código por el cual se diseñó el SCE utilizando la red Blockchain de Ethereum.

2) <https://www.youtube.com/watch?v=x0CfBLcDHJ0>

Video explicativo donde se muestra la red en funcionamiento, los contratos inteligentes desplegados en una red de pruebas, la creación de derechos de emisión tokenizados, la creación de billeteras digitales, la transferencia de derechos de emisión, la presentación de reportes de emisión y todo el ciclo de cumplimiento, compra y venta de derechos de emisión.

3) Para enlaces adicionales de los contratos inteligentes, billeteras digitales usadas y las transacciones, ver Anexo 4.

Comparativo de Modelos

El modelo transaccional tradicional para el SCE y el modelo transaccional propuesto usando la tecnología Blockchain cumplen el mismo propósito, pero funcionan de manera diferente.

En la tabla 6 se describen las principales variables del SCE y se presenta un paralelo de su funcionamiento en un SCE tradicional y un SCE usando la tecnología Blockchain.

Tabla 6

Comparativo SCE tradicional vs. SCE con Blockchain

Variable	SCE tradicional	SCE y Blockchain
Agentes	Empresas reguladas, reguladores, verificadores, entre otros (oferta, demanda, intermediación). Cuentas creadas bajo sistemas tradicionales.	Los mismos participantes. Cada participante actúa en la red a través de una billetera virtual y con sus llaves criptográficas.

CAP o límite	Cantidad de cupos de emisión. El administrador debe llevar un registro y seguimiento de las operaciones y movimientos de estos derechos creados.	Tokens emitidos en la red por el regulador. Cada token representa una tCO ₂ , el registro de los saldos y movimientos se llevan automáticamente en la red Blockchain de manera segura y pública, de acuerdo con los permisos que se otorguen.
Punto de regulación	Monitoreo, reporte y verificación de emisiones. Se mide la cantidad de cupos por empresa. La empresa debe realizar el reporte y debe existir un mecanismo para su validación.	Los reportes de emisión son información de entrada en la red. Cada transacción queda registrada públicamente y de manera transparente se lleva a cabo la verificación de los reportes de emisión en la red. Los contratos inteligentes facilitan el proceso de compensación de derechos de emisión y verificación del cumplimiento de las metas de reducción.
Uso de compensaciones y vinculación	El Gobierno puede considerar el uso de certificados de carbono del mercado no regulado y la transferencia de derechos de emisión entre SCE, para lo cual debe garantizar el registro y la veracidad de la información con tecnologías tradicionales.	Se puede dar la interacción entre diferentes Blockchain, o incluso entre Blockchain y tecnologías tradicionales, lo que facilitará la vinculación internacional de una manera transparente y segura. El regulador cuenta con el mecanismo para emitir derechos de emisión dentro de la red, que representan certificados del mercado no regulado para que se puedan usar por las empresas y así compensar sus emisiones.
Registro y supervisión	El Gobierno debe contar con un sistema de registro para el seguimiento de la propiedad de los derechos de emisión, registro de operaciones, compensación y liquidación. Lo anterior, garantizando seguridad de la información y validez.	La misma red Blockchain actúa como un sistema de registro y supervisión. El Gobierno puede acceder a la información de saldos y transacciones de forma instantánea. Se garantiza la confiabilidad de la red, gracias a las propiedades de la descentralización.
Mercado secundario	Para la compra y venta de derechos de emisión y el registro de las operaciones, el Gobierno debe contar con una casa de cambio o intercambio centralizado.	La plataforma Blockchain permite registrar ofertas y demandas de derechos de emisión y actuar como un intercambio descentralizado. El registro de las operaciones y propiedad de los derechos se lleva automáticamente en la red.

Nota. Elaboración propia con información del marco conceptual.

7.5. Costos de Implementación y Operación de un SCE

7.5.1. Costos Transaccionales

El objetivo del presente capítulo es presentar un comparativo de costos de implementación y operación de un SCE usando tecnologías tradicionales vs. SCE usando la tecnología Blockchain. Es importante aclarar que el estudio de costos sólo comprende los aspectos de registro y transacción del SCE, donde la tecnología Blockchain puede aportar de mejor manera una solución efectiva.

En medio de las dificultades y restricciones en la búsqueda de información real se acudió a diversas fuentes de consulta, logrando encontrar reducida información de fuentes primarias. Con éstas se pudo extraer los costos operativos, registros y operación aproximados para SCE en diferentes países que en la actualidad operan con éxito.

A continuación, la Tabla 7 muestra los datos hallados, organizados de manera tabulada para una mejor visualización.

Tabla 7

Costos transaccionales de SCE existentes

ETS	Año	PIB en USD	% Participación (PIB país / Sumatoria PIB)	CAP en TCO2	Costos en USD	Costos / Cap	Detalle
California	2.019	3.137.469.000.000	42,1%	346.300.000	2.000.000	0,58%	Cap-and-trade services, Personal y Operaciones directas.
Quebec	2.019	610.847.703.300	8,2%	56.850.000	865.493	1,52%	Cap-and-trade services, Personal y Operaciones directas.
Alemania	2.010	3.396.000.000.000	45,6%	454.864.599	3.578.919	0,79%	Costos de comercio y otros (costos de información y generales).
Irlanda	2.016	300.500.000.000	4,0%	17.737.452	553.400	3,12%	Licencia de software, soporte, mantenimiento, seguridad y capacitación.
Sumatoria		7.444.816.703.300	100,0%		Promedio	0,85%	

Nota. Elaboración propia con datos de (Heindl, 2012), (Carbon Trust, 2017), (WCI, Inc., 2019).

En este recuadro se halló un promedio ponderado del factor de Costos/CAP, el cual se usará para estimar los costos aproximados que puede tener el SCE para Colombia, acorde con su nivel de emisiones. Lo anterior, con base en cada uno de los SCE anunciados.

Para ello se calculó el promedio ponderado entre esta columna (Costos/Cap) y el porcentaje de participación de los PIB para cada uno de los SCE, frente al total de la suma de los SCE objeto de análisis. De esta manera se encontró que el factor para aplicar al caso colombiano es de **0.85%**, que al proyectarlo con el CAP estimado del país daría un total de USD 395.471.

En la Tabla 8 se encuentra el CAP estimado para Colombia y se multiplica por el factor de costos encontrado.

Tabla 8

Costos transaccionales para SCE en Colombia

ETS	Año	PIB en USD	CAP en TCO2	Costos en USD (0,85% *CAP)	Detalle
Colombia	2.019	323.803.000.000	46.354.420	395.471	Costo aproximado para operar el SCE en Colombia

Nota. Elaboración propia.

Adicionalmente, indagando sobre valores de mercado de plataformas transaccionales como *Trayport*, usualmente utilizadas para el mercado de valores de alta complejidad, se encontró que el costo de adquisición de la plataforma esta entre **1 y 2 millones de dólares**.

7.5.2. Análisis de Costos de Plataformas

Para realizar el comparativo de costos se utilizaron dos datos importantes. El primero es el presupuesto aproximado de los costos anuales para la implementación y desarrollo de una plataforma en Blockchain para el SCE en Colombia. Esto se realizó mediante el análisis hecho durante el diseño del prototipo del SCE en Blockchain de la presente consultoría y el apoyo de entrevistas con un experto programador en Blockchain, asesor de una importante empresa que no se mencionará, dando cumplimiento a los requisitos de reserva de la información estipulados en la consultoría. De este análisis se obtuvo un costo anual de 91.787 USD. (Ver anexo 3 para los detalles).

El segundo dato corresponde a información primaria de los costos operativos para el 2019 de una empresa de registro y comercio en Blockchain con características similares requeridas para el funcionamiento del SCE. Dicha información presenta unos costos anuales de 376.630 USD.

La Tabla 9 contiene el resumen de los datos encontrados y al mismo tiempo se compara con los costos estimados anuales del SCE para Colombia en una plataforma tradicional, hallados mediante el procedimiento previamente explicado.

Tabla 9*Comparativo de costos transaccionales anuales*

Plataforma	Costos anuales aprox. en USD	Descripción
Diseño y desarrollo plataforma Blockchain	91.787	Implementación, infraestructura y uso de plataforma transaccional en Blockchain (Ethereum). No se consideran los costos financieros, de servicio, ni otros que puedan ser necesarios para la operación de la solución.
Plataforma en Blockchain del mercado de carbono	376.630	Costos de registro y comercio de plataforma en Blockchain con características similares a las requeridas para el SCE.
Costos aproximados para Colombia plataforma tradicional	395.471	Costo aproximado para operar el SCE en Colombia, obtenido a partir de los datos investigados.

Nota. Elaboración propia.

De este modo se puede evidenciar que comparativamente, y teniendo en cuenta la información disponible y los análisis expuestos anteriormente, una plataforma para un SCE en Colombia soportada en la tecnología Blockchain puede reducir ostensiblemente los costos anuales, comparado con una plataforma tradicional. Menores costos pueden disminuir las barreras de entrada y mejorar los ingresos del sistema.

7.6. Costos de Corrupción en un SCE

A diferencia de los productos básicos tradicionales, que en algún momento durante el curso de su intercambio en el mercado deben entregarse físicamente a alguien, las unidades de carbono no representan un producto físico entregable, sino que se han descrito como un *commoditie* o producto virtual legal que muchos vendedores, compradores y comercializadores no logran entender completamente. Esta falta de comprensión, entre otros factores, hace que el comercio de carbono sea particularmente vulnerable al fraude y otras actividades ilegales.

Los mercados de carbono, al igual que otros mercados financieros, también corren el riesgo de ser explotados por delincuentes, debido a la gran cantidad de dinero que fluye, la inmadurez de las regulaciones y la falta de supervisión y transparencia (Organización Internacional de Policía Criminal [INTERPOL], 2013).

La corrupción impacta el éxito de los Sistemas de Comercio de Emisiones al reducir la confiabilidad y efectividad general del mercado. La implementación de SCE, tanto en los países

desarrollados como en desarrollo, se ha visto afectada de manera recurrente por casos de crímenes informáticos, fraude y soborno, abusos de poder y otras formas convencionales de corrupción.

De acuerdo con el Foro Económico Mundial, se estima que al menos \$2.6 billones de dólares son robados anualmente por la corrupción, el equivalente al 5% del Producto Interno Bruto mundial. En Colombia, informes de la Procuraduría y la Contraloría revelaron que, en 2016, el fenómeno de la corrupción le costó al país casi el 5% del Producto Interno Bruto, dineros que podrían financiar las inversiones públicas más urgentes.

A continuación, se presentan los principales tipos de corrupción que se dan en los SCE y ejemplos de casos puntuales de su materialización.

- a) **Manipulación de la información en los reportes de emisión:** Hay varias formas de manipular estos reportes. Lo más obvio es que los datos se pueden informar erróneamente de forma intencionada. Más sutilmente, aquellos que realizan las mediciones pueden distorsionar su análisis midiendo solo ciertas variables, una elección selectiva de sitios para recopilar datos o la adopción de ciertos supuestos en el cálculo. En muchos países en desarrollo, la falta de datos confiables y/o la escasa capacidad institucional para monitorear el proceso de recolección de datos brindan una amplia oportunidad para que aquellos con intereses creados manipulen las mediciones de carbono en su propio beneficio.
- b) Para abordar este riesgo, se requiere la validación y verificación de terceros antes de que a una empresa se le reconozca cierta cantidad de emisiones. Esta función es realizada por entidades previamente registradas y avaladas por el Gobierno o entidades de acreditación. Incluso, los auditores externos independientes pueden ser susceptibles a sobornos o corrupción para manipular los resultados. Particularmente cuando las empresas incluyen élites estatales e intereses comerciales poderosos, las agencias de auditoría o el personal individual pueden estar sujetos a una presión política considerable. También se les pueden ofrecer sobornos para verificar las mediciones de carbono que muestran información no ajustada a la realidad. Con la tecnología Blockchain se podría descentralizar la presentación y la verificación de los reportes de emisión, generando inmutabilidad en la información presentada y

trazabilidad del proceso. Adicionalmente, usando dispositivos de Internet de las Cosas, se podría automatizar la medición de las emisiones en cada empresa, eliminando las posibilidades de manipulación de la información.

- c) Venta de derechos de emisión y certificados de carbono que no existen o pertenecen a otra persona: según INTERPOL (2013) esta práctica se ve facilitada “por el hecho de que no existe ninguna indicación física de la identidad de la persona que posee los derechos de carbono, más allá de un papel o un registro en una plataforma”. Esto aumenta el riesgo de corrupción gubernamental que permite el registro “de documentos falsificados relacionados con la propiedad de derechos de emisión” INTERPOL (2013).

Es difícil evitar que el propietario de los derechos de emisión venda los mismos una y otra vez a múltiples partes, una práctica conocida como “doble contabilidad”. La doble contabilidad puede ser más difícil de evitar cuando los derechos de emisión se pueden vender a través de varias bolsas extranjeras con diferentes regulaciones y estándares laxos de monitoreo o verificación cruzada entre las bolsas. El informe resalta la importancia de regulaciones estrictas para monitorear la transferencia de derechos de emisión a través de varios intercambios extranjeros, particularmente el control cruzado entre esos intercambios.

En un ejemplo de doble cómputo, los certificados de carbono se negociaron en el EU-ETS y luego, después de ser utilizados para compensar emisiones, volvieron al EU-ETS a través de una serie de transferencias internacionales. En efecto, esto permitió que esos mismos certificados de carbono compensaran las emisiones dos veces. En marzo de 2010, el Gobierno húngaro revendió 2 millones de unidades de carbono que las empresas le habían entregado INTERPOL (2013).

En 2014, la corte suprema de Nueva Gales del Sur en Australia determinó que una empresa, Shift Neutral, había afirmado “haber generado más de mil millones de dólares en certificados de carbono”. Vendió algunos de ellos a una escuela en Sydney, declarando así la escuela “carbono neutral”. Los certificados fueron descritos por el juez interino Nicholas como “inexistentes y los números eran falsos” (Lang, 2014).

Debido a las propiedades de la tokenización como la transparencia, seguridad, trazabilidad, entre otros, en un registro con la tecnología Blockchain sería imposible el doble gasto de las unidades de carbono.

- d) Explotación de regulaciones débiles para cometer delitos financieros: muchos tipos de fraude financiero, bien conocidos en otros sectores, también se están abriendo camino en el mercado del carbono. Los reguladores financieros deben estar atentos a los delincuentes de "cuello blanco" que ingresen al mercado del carbono y estar atentos a delitos financieros como el fraude de valores, la evasión fiscal y el blanqueo de capitales.

Cuando hay vinculación de SCE entre diferentes países, los derechos de emisión se pueden generar en un país, vender a personas en otro y comercializar a través de varios intercambios de carbono antes de llegar a las manos del propietario final. Cuantos más países participen, más difícil será rastrear el derecho de emisión desde su origen hasta el comprador final, y más fácil será para los delincuentes aprovechar cualquier laguna legal o regulaciones inconsistentes entre las diferentes legislaciones nacionales. Los organismos encargados de hacer cumplir la ley y los reguladores a menudo tienen una capacidad limitada para trabajar fuera de su propia jurisdicción legal nacional, lo que hace que el cumplimiento de los mercados internacionales de carbono sea complicado y difícil, sin una respuesta de cumplimiento global adecuada.

En 2009, las autoridades comenzaron a observar grandes volúmenes de comercio en la bolsa de carbono *BlueNext*, de Francia. Investigaciones posteriores revelaron que el repentino aumento en el comercio fue el resultado de delincuentes altamente organizados que comercializaron grandes volúmenes de derechos de emisión, como parte de un plan de fraude carrusel. La agencia de policía europea, Europol, estimó posteriormente que hasta el 90% de todo el comercio de carbono en algunos países era el resultado de estas actividades fraudulentas. Se estima que este fraude ha provocado pérdidas para varios gobiernos de alrededor de 5.000 millones de euros, en poco más de 18 meses (PMR y ICAP, 2016).

Bajo el desarrollo actual de los compromisos climáticos y la lógica *Bottom up* del Acuerdo de París, observamos una creciente y nueva generación de mercados climáticos tendientes a desarrollarse como una red de mercados descentralizados, con posibilidad de unirse a nivel

nacional e internacional. Es así como tendremos diferentes unidades de carbono custodiadas en diferentes registros.

En este sentido, el Banco Mundial ha venido desarrollando como prueba piloto el *Climate Warehouse*, un metaregistro desarrollado en tecnología Blockchain que busca desarrollar la arquitectura de la nueva generación de mercados climáticos para llevar la trazabilidad de las diferentes unidades de carbono y evitar fenómenos de doble contabilidad en los distintos registros¹⁷

- e) Delitos en Internet y piratería informática para robar derechos de emisión: De acuerdo con los mecanismos del Protocolo de Kyoto, se han establecido registros nacionales para realizar un seguimiento de todos los derechos de emisión. Se han realizado transacciones en estos registros, transfiriendo unidades de las cuentas de los vendedores a las cuentas de los compradores. Las debilidades en los sistemas y en la seguridad de estos registros han sido aprovechadas por delincuentes para robar derechos de emisión. La naturaleza tradicional de estos registros hace que el mercado de carbono sea particularmente susceptible a delitos tecnológicos como la piratería. Aunque los derechos de emisión pueden identificarse por medio de números de serie únicos, lo que hace posible rastrear los derechos de emisión robados, esto puede verse socavado por una supervisión regulatoria débil, particularmente cuando los derechos robados se negocian en diferentes jurisdicciones.

Un ataque de piratería en noviembre de 2010 resultó en el robo de 1,6 millones de derechos de emisión de la cuenta de registro rumana de Holcim Ltd., la segunda cementera más grande del mundo. La piratería se llevó a cabo utilizando un virus llamado "Nimkey" que robó datos de cuentas de las computadoras de dicha Compañía. Los piratas informáticos utilizaron los datos para iniciar sesión en el registro rumano y transferir los derechos de emisión por valor de 23,5 millones de euros (Dobson, 2015).

¹⁷ Para mayor información consultar: <https://www.worldbank.org/en/programs/climate-warehouse>

En enero de 2011, los piratas informáticos robaron 2 millones de unidades de carbono de registros en Austria, República Checa, Estonia, Grecia y Polonia. Los usuarios que intentaban acceder a los sitios web de estos registros eran redirigidos a sitios web falsos creados por los piratas informáticos, donde cualquier transacción intentada se redirigía a cuentas controladas por los *hackers*.

En 2011, una estafa que involucró a la República Checa, Polonia, Estonia y Liechtenstein involucró 500 mil derechos de emisión de carbono robados por valor de 28 millones de euros (Mason, 2011).

En 2013, los piratas informáticos de carbono Dragon, Randhawa y su asociado Sangha fueron "condenados a cinco años y medio de prisión combinados por piratería de carbono" (Funk, 2015, pág. 1). En 2011, habiendo fallado inicialmente en completar un pirateo del registro de carbono de MDL, lograron "desviar 350.000 certificados de carbono, cada uno por valor de 15 €, de un registro español dentro del sistema de comercio de carbono de la Unión Europea" (Funk, 2015, pág. 1). Un par de años después algunos de estos derechos de emisión fueron revendidos a BP por casi 89 mil euros (Funk, 2015).

En 2011, la Unión Europea se enfrentó a una acción legal iniciada por una empresa italiana a la que le habían robado 267.991 derechos de emisión, por la forma en que había manejado los efectos del cibercrimen en el EU ETS (Macalister, 2011).

Este incidente muestra que, debido a la naturaleza electrónica de los derechos de emisión, los piratas informáticos pueden mover rápidamente las unidades de carbono robadas fuera de la jurisdicción y a través de los registros nacionales de otros países. El seguimiento de esos derechos robados, por lo tanto, requiere una respuesta policial global y una investigación multinacional.

Cuando se comercia entre jurisdicciones internacionales, la capacidad de monitoreo a menudo se diluye y el doble conteo y la venta de derechos de carbono no existentes o robados son mucho más viables. Lo que se garantiza con el uso de la tecnología Blockchain es la seguridad, transparencia y trazabilidad del recorrido de la propiedad de los derechos de emisión, tanto a nivel nacional como internacional.

La adopción de tecnologías y mecanismos regulatorios nuevos e innovadores es quizás la mayor perspectiva para garantizar la integridad del mercado del carbono. Actualmente están siendo adoptados sistemas para regular los mercados financieros por el EU ETS. También se ha sugerido que este tipo de implementación podría ir aún más lejos y que Blockchain, la tecnología que sustenta a Bitcoin con un sistema de mantenimiento de registros automatizado que proporciona un registro público permanente y que hasta ahora ha demostrado ser altamente resistente a la piratería, podría adaptarse al mercado de carbono para “aumentar la transparencia” (Dobson, 2015, pág. 12).

f) Otros casos del mercado voluntario: Según una encuesta realizada en marzo de 2010 por *Point Carbon 1*, como proveedor de información para el mercado del carbono, el 15% de 890 encuestados de organizaciones cubiertas por la regulación del carbono dijeron haber visto fraude, malversación o corrupción en un proyecto MDL o JI con China, tal vez como era de esperar, dado que alberga más del 42% dichos proyectos. Las irregularidades mencionadas con más frecuencia fueron:

- Venta múltiple del mismo proyecto o certificados, mediante la falsificación de registros;
- Falsificación de las afirmaciones científicas de la reducción de carbono prometida para demostrar adicionalidad;
- Sobre cálculo de la cantidad de certificados de carbono generados por el proyecto;
- Venta falsa de un proyecto que ni siquiera existe; y
- Soborno de funcionarios gubernamentales para facilitar aprobaciones o asegurar derechos en países en desarrollo (PriceWaterhouseCoopers [PWC], 2011).

7.6.1. Casos de Corrupción en SCE y sus costos asociados

En la Tabla 10 se resume las irregularidades y casos de corrupción que fue posible encontrar. Se organizaron por tipo de delito, año, SCE donde sucedieron y el valor perdido en tCO₂ y su equivalente monetario. Tomando los datos del precio promedio anual de las unidades de carbono y el tamaño del mercado en el año que se materializó la irregularidad, se obtuvo el porcentaje de pérdida para cada uno de los casos. Posteriormente se calculó un promedio ponderado del porcentaje de pérdida en cada caso y el tamaño del SCE (8,86%). Al mismo tiempo, se obtuvo un promedio de los porcentajes de pérdida (5,21%).

Los datos obtenidos se contrarrestaron con el valor de la corrupción global como porcentaje del PIB, que fue del 5% (Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito [UNODC], 2019), y el valor de la corrupción en Colombia como porcentaje del PIB que asciende al 5% igualmente (Gerente, 2016).

Tabla 10

Casos de corrupción y costos asociados

Tipo corrupción	año	ETS	Valor pérdida	Tamaño mercado co2	Participación	Precio Promedio Euros	Valor total mercado	Porcentaje perdida	Valor en EUR
Manipulación de la información en los reportes	2010	ETS	15% cometen fraude, malversación o corrupción						
Venta de derechos que no existen o pertenecen a otras entidades	2010	Hungría	2 millones créditos	22.991.711	0,24%	14,37	330.390.887	8,70%	28.740.000
	2014	Australia	1.000 millones de dólares	530.000.000	5,59%	11,88	6.296.400.000	0,01%	752.842
Explotación de regulaciones débiles para cometer delitos financieros	2009	EU ETS	5000 millones Euros	1.879.618.226	19,81%	13,14	24.698.183.490	20,24%	5.000.000.000
	2010	EU ETS Fraude del IVA	6,45 billones	1.938.803.140	20,43%	14,37	27.860.601.122	23,15%	6.450.000.000
Delitos en Internet y piratería informática para robar derechos de emisión	2010	Rumania	23,5 millones euros	47.344.119	0,50%	14,37	680.334.990	3,45%	23.500.000
	2011	Austria, Rep Checa, Estonia, Grecia y Polonia	2 millones créditos	381.460.621	4,02%	13,01	4.962.802.679	0,52%	26.020.000
	2011	Rep Checa, Estonia y Polonia	28 millones euros	292.023.022	3,08%	13,01	3.799.219.516	0,74%	28.000.000
	2011	España	5,2 millones euros	132.687.966	1,40%	13,01	1.726.270.438	0,30%	5.200.000
	2011	EU ETS	267.991 créditos	1.904.387.524	20,07%	13,01	24.776.081.687	0,01%	3.486.563
	2010	Alemania	3 millones euros	454.864.599	4,79%	14,37	6.536.404.288	0,05%	3.000.000
	2011	EU ETS	3 millones tco2	1.904.387.524	20,07%	16,67	31.746.140.025	0,16%	50.000.000

Nota. Elaboración propia con datos de diversas fuentes. INTERPOL (2013), (Funk, 2015), (Macalister, 2011), PWC (2011), (Dobson, 2015).

En la Tabla 11 se presentan los cuatro factores usados para hallar el promedio de corrupción como porcentaje del tamaño del mercado del SCE.

Tabla 11

Cálculo de factor de corrupción en SCE tradicionales

Promedio ponderado % pérdidas y tamaño del SCE	Promedio de los % de pérdida	Corrupción Global % PIB Global	Corrupción Colombia % PIB
8,86%	5,21%	5%	5%
		Promedio	6,02%

Nota. Elaboración propia.

Se puede notar que el porcentaje de pérdida (5,21%) en los SCE en los que se logró identificar irregularidades no está muy alejado del promedio nacional de corrupción (5%) y global del costo de la corrupción (5%).

Para estimar un valor aproximado de la pérdida esperada en el SCE para Colombia se describe el tamaño del mercado y el precio. Luego se multiplica por el factor promedio de corrupción encontrado de 6,02% y se obtiene el costo asociado a la corrupción en el nuevo SCE.

Tamaño del mercado. La meta de mitigación de Colombia aún se encuentra en proceso de definición. Hasta el momento, se ha definido que, como meta mínima de mitigación, no se podrá exceder las 169,44 Mt CO₂e de emisiones de GEI en 2030, equivalente a una reducción prevista del 51% de las emisiones proyectadas en 2030.

De acuerdo con la información del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero para el año 2014, las emisiones totales de GEI fueron de 237 MtCO₂e en 2014 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018). Actualmente, de acuerdo con el NDC¹⁸ de Colombia

¹⁸ Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC, por sus siglas en inglés) de la República de Colombia para el periodo 2020-2030. A las metas de lucha contra el cambio climático.

para 2020, se tiene la siguiente información proyectada de emisiones con base en el escenario de 2014.

La Tabla 12 muestra la desagregación de emisiones para el escenario de referencia proyectado a 2030.

Tabla 12

Inventario nacional de gases efecto invernadero para Colombia

IPCC nivel 1	2015	2020	2025	2030
i{1} Energía	86,67	88,6	106,47	124,80
i{2} Procesos Industriales y Uso de Productos	9,42	10,66	14,54	18,41
i{3} AFOLU (Agricultura, Silvicultura y otros usos del Suelo)	117,94	170,44	186,45	174,5
i{4} Residuos	19,55	21,60	25,24	28,09
Total (Mt CO2 eq)	233,58	291,30	332,70	345,80

Nota. Tomado de Ministerio del Ambiente (2020).

Como se refleja en la Tabla 12, para el año 2020 en Colombia se tiene un total de 291,30 MtCO₂. Tomando en cuenta los informes preliminares de consultoría y referencias internacionales, se detecta que los primeros sectores en formar parte del SCE podrían ser el de energía y procesos industriales. Para estos sectores se tiene una emisión aproximada para Colombia de 99,26 MtCO₂, que es la suma de ambos sectores. Esto corresponde al 45,26% del total de las emisiones. En las fases iniciales de los SCE, generalmente se cubren solo las empresas que se encuentran por encima de ciertos umbrales de contaminación. En el caso de México, que inició el SCE en el año 2020, en su fase piloto se cubren las empresas que generan más de 100.000 tCO₂ anuales. Las emisiones anuales de México son de 733,8 MtCO₂ en 2017 y el CAP es de 271,3 MtCO₂ en 2020. Este CAP representa el 46,7% del total de emisiones de ambos sectores (energía y procesos industriales).

Considerando que el SCE de México es el ejemplo más reciente y cercano a Colombia, se toma este dato como referencia. Al multiplicar este factor (46,7%) por el tamaño en toneladas de CO₂ de estos sectores para Colombia (99,26 MtCO₂), se determina un **CAP de 46,354.420 tCO₂**. Vale decir que este ejercicio busca plantear un dato aproximado, pues hasta el momento de desarrollo de la investigación, no se conoce el CAP real para Colombia.

Precio de las emisiones. Según el ICAP (2016) existen dos mecanismos para la asignación de precios al carbono: el comercio de emisiones y el impuesto al carbono. Ambos pretenden internalizar los costos que las emisiones de carbono imponen sobre la sociedad. Con el impuesto al carbono el Gobierno fija el precio y permite al mercado determinar la cantidad de emisiones. En el comercio de emisiones el Gobierno establece la cantidad de emisiones y permite que el mercado cree el precio. También existen sistemas híbridos, que combinan elementos de ambos enfoques, por ejemplo, un SCE con precios mínimos y máximos o regímenes fiscales que aceptan unidades de reducción de emisiones para disminuir la carga impositiva.

Históricamente en la UE y California las emisiones son otorgadas en las subastas a precios base estipulados por el emisor y, posteriormente en el comercio de emisiones, los precios se forman por la oferta y demanda de derechos de emisión. Los gobiernos cuentan además con mecanismos de contención de precios (reserva y umbrales) que los mantienen dentro de niveles preestablecidos, para evitar especulaciones.

En Colombia, como no es posible hablar de un precio de las emisiones por no tenerse actualmente un mercado, se usa el valor del impuesto actual al carbono como referente para realizar la estimación del tamaño del mercado. Inclusive, el resultado preliminar de algunas consultorías para el diseño del SCE proponen el valor del impuesto al carbono como el precio mínimo de los cupos de emisión.

Para el año 2020 el valor de impuesto es de \$17.211. Al ser multiplicado por 46,354.420 tCO₂ tenemos un valor de mercado aproximado de **\$797.805.922.620** (pesos colombianos). Convertido a dólares, a una tasa promedio de \$3.700, el valor de mercado es de **215,62 millones de dólares**. Tomando el factor promedio de corrupción entre los datos encontrados de 6,02%, se tiene que el valor estimado de las pérdidas por la corrupción e irregularidades en el SCE para

Colombia, de acuerdo con los datos encontrados y la información disponible, podría ascender a **12,98 millones de dólares** (el equivalente a **48.027.916.542 COP**).

Respecto al precio en Colombia se podría pensar en un modelo de precios híbridos. Por una parte, se contaría con un SCE que le implicaría al Gobierno establecer la cantidad máxima de emisiones y permitir que el mercado determine el precio, el cual además estaría regido por una estrategia tipo collar, entendida como una banda de precios con máximos y mínimos cuyo rango propuesto está encaminado a reducir la volatilidad de precios de los derechos de emisión que están en circulación.

7.7. Ventajas y Desventajas de SCE Soportado en Tecnología Blockchain

A continuación, la Tabla 13 presenta las ventajas que tiene un SCE soportado en tecnología Blockchain, en comparación con un SCE en plataformas tradicionales.

Tabla 13

Ventajas de SCE soportado en Blockchain vs. SCE tradicional

SCE en Blockchain	SCE tradicional
Blockchain mejora la contabilidad, transparencia y eficiencia del mercado de carbono (UNFCCC)	Limita la contabilidad, transparencia y eficiencia del mercado de carbono (UNFCCC), abriendo puertas a una doble contabilidad y fraudes
Se puede tener menores costos de transacción, dado por la automatización de los procesos del SCE usando Blockchain (GIZ 2019).	Los costos son mayores debido a que se requieren más intermediarios a lo largo del proceso
Un token puede representar un derecho de emisión de CO2 y poder ser transferido fácilmente a través de los participantes de la red Blockchain, garantizando el óptimo funcionamiento del SCE (GIZ 2019).	Los derechos de emisión no cuentan con un token que facilite la contabilidad y transacción. Se debe tener un sistema centralizado de registro e identificación de los derechos, susceptible a errores humanos y manipulación.
Existen copias de transacciones en diversos nodos de agentes participantes, lo que mejora la seguridad en los respaldos e inmutabilidad en la información. Para gestionar las transacciones (asignación, transferencia, entrega, cancelación) de derechos de emisión digitales, la tecnología Blockchain permite el registro de transacciones de forma similar a un sistema bancario, ofreciendo	Los registros se encuentran centralizados en un agente, lo que incrementa el riesgo de seguridad de la información.

mayor seguridad, trazabilidad y transparencia (GIZ 2019).

Blockchain permite tener información pública, inmediata y veraz, para todos los interesados, acerca de los movimientos de los derechos de emisión entre las empresas y sobre los reportes de emisión.

La información no es pública, ya que se encuentra en una plataforma centralizada. Se debe esperar los informes del administrador, lo cual puede generar demora, manipulación en los datos o información oculta.

Lo que se garantiza con el uso de la tecnología Blockchain es la seguridad, transparencia y trazabilidad del recorrido de la propiedad de los derechos de emisión, tanto a nivel nacional como internacional (INTERPOL 2013).

Cuando se comercia entre jurisdicciones internacionales, la capacidad de monitoreo a menudo se diluye. Para que exista confianza entre los países, se deben tener mecanismos robustos que garanticen la veracidad de la información, lo cual no es fácil de obtener con tecnologías tradicionales.

Blockchain podría ayudar a evitar fraudes, proteger el sistema, evitar problemas de doble contabilidad; además, se podría diseñar un sistema con dispositivos inteligentes que permita medir más fácilmente las emisiones de carbono, utilizando menos fuerza laboral humana (Fu, Shu, & Liu, 2018).

Se han encontrado varios ejemplos en diferentes SCE en donde, usando tecnologías tradicionales, se han visto casos de fraudes y corrupción que han originado la pérdida de millones de tCO₂, además de su equivalente monetario.

Nota. Elaboración propia con datos de diversas fuentes. INTERPOL (2013), (Fu, Shu, & Liu, 2018), (UNFCCC), GIZ (2019).

7.7.1. Ventajas

En términos generales se resume las principales ventajas que posee la tecnología Blockchain, adicional a los beneficios ya presentados durante el trabajo y que hacen énfasis particular a los SCE.

Reducción de Costos de Corrupción. Dada la naturaleza de esta tecnología, los datos permanecen almacenados en ella de forma cifrada (encriptada) e irreversible (no se puede alterar o cambiar). En términos prácticos, ofrece a la entidad que la adopta, y a los beneficiarios de los procesos, una característica que fomenta la transparencia en sus procesos misionales. Esto también puede ayudar a mantener la confianza e integridad, incluso en SCE vinculados, lo cual es importante para países latinoamericanos con un riesgo alto de corrupción.

Reducción de Costos Operacionales. Instituciones y ciudadanos pueden interactuar directamente sin la necesidad de terceros que validen sus transacciones, eliminando así la fricción y las demoras asociadas a la intervención de más actores en un proceso. En un SCE, la eliminación de numerosos intermediarios y la no necesidad de robustas infraestructuras tradicionales privadas para garantizar la seguridad, impactan en la reducción de los costos

transaccionales. Además, se vuelve potencial el que empresas de menor tamaño, e incluso personas naturales, puedan participar en el SCE, mejorando la inclusión y participación de todos los sectores.

Trazabilidad. Una de las características más importantes de la tecnología Blockchain, dada su inmutabilidad de los registros y almacenamiento de los eventos que suceden, es la posibilidad de conocer la traza completa de un elemento de información desde el primer momento que éste se almacena en la red Blockchain. Esto permite, por ejemplo, que un derecho de emisión pueda estar plenamente identificado y que sus atributos asociados se conozcan. Por ejemplo, cuándo y quiénes intervinieron en las transferencias.

Lo anterior puede hacer que los datos transaccionales puedan estar disponibles para todos en la sociedad con mayor detalle, pertinencia y veracidad, sin comprometer la privacidad de los comerciantes, gracias al uso de direcciones criptográficas. Este escrutinio de datos públicos puede fortalecer el sistema y reducir el riesgo de corrupción.

Base de Datos Descentralizada. Otra de las características distintivas de Blockchain frente a otras tecnologías de gestión de la información, es que las bases de datos, al no estar en un único servidor o centro de datos, proporcionan resiliencia a los datos (los datos no se pierden). Lo anterior se logra dado que no dependen de un registro único como fuente de información. Es decir, hay un solo punto de falla. Los registros distribuidos permiten que la inmutabilidad de los datos y la confiabilidad del sistema sean únicas, en comparación con las bases de datos tradicionales (Espinosa, 2020).

7.7.2. Desventajas

A continuación, se presentan las principales falencias que puede tener la tecnología al aplicarse en un SCE. Se plantean, al mismo tiempo, las posibles soluciones que se discuten alrededor de cada tema.

Blockchain Usa Energía Excesiva. Los mineros que validan transacciones y las granjas mineras gigantes emplean una cantidad desproporcionada de electricidad, usando el poder computacional que da origen a la creación del siguiente bloque. En un mundo donde la generación de energía actual es un problema climático, el procesamiento de Blockchain puede ser cuestionable. Es importante anotar que actualmente existen nuevas tecnologías Blockchain

que intentan resolver el tema del consumo energético, usando algoritmos de consenso alternos como el *Proof of Stake* (PoE) y *Proof of Authority* (PoA).

El PoE o prueba de participación elimina la necesidad de gastar una gran cantidad de energía eléctrica para validar los bloques. Los participantes de Blockchain con la mayor participación son seleccionados por el algoritmo para el derecho a validar los bloques. La suposición detrás de PoE es la siguiente: aquellos que tienen una participación en una red están incentivados para actuar en sus intereses. En igualdad de condiciones, cuanto más participación tenga uno, mayor debería ser su interés en preservar el sistema.

PoA es un algoritmo de consenso basado en la reputación que presenta una solución práctica y eficiente para las redes Blockchain (especialmente las privadas). El modelo de prueba de autoridad se basa en un número limitado de validadores de bloques, lo que lo convierte en un sistema altamente escalable. Los bloques y transacciones son verificados por participantes preaprobados, quienes actúan como moderadores del sistema.

Gestión de Claves Privadas de la Billetera Virtual. Para acceder a los recursos o a la información almacenados por el usuario en Blockchain, se necesita clave privada. Esta se genera durante el proceso de creación de la billetera virtual y es responsabilidad del usuario tomar nota de ello, asegurándose de que no se comparta con nadie más. Si no se hace, la billetera se encuentra en peligro. Además, si un usuario pierde la clave privada, perderá para siempre el acceso a la billetera. Las claves privadas de la billetera virtual que sean perdidas no pueden ser recuperadas sin considerar medidas predefinidas de seguridad adicional. Esto se traduciría en la pérdida de los derechos de emisión depositados en dichas billeteras (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit [GIZ], 2019).

Se pueden usar mecanismos como las llaves OTP (*One Time Password*) que interactúen con soluciones centralizadas y la Blockchain para proteger las contraseñas de los usuarios del SCE. El administrador puede contratar o diseñar mecanismos para la gestión de las llaves propias y de los usuarios, donde se pueda plantear la posibilidad de tener diferentes herramientas, de acuerdo con el nivel de seguridad necesario para cada participante.

Madurez. La tecnología Blockchain tiene solo una década. Es una nueva tecnología emergente y en proceso de maduración. Todavía existe un largo camino antes de que esta tecnología se considere estandarizada. Como toda nueva tecnología, se requiere tiempo para estar

completamente óptima. Los avances han sido notables, especialmente en los últimos años, y cada vez son mayores los casos de gobiernos y empresas que la implementan.

Costos de Implementación. En la práctica, Blockchain ofrece grandes beneficios gracias a sus propiedades de descentralización e inmutabilidad de la información. Sin embargo, la implementación de Blockchain podría ser más costosa al inicio, debido a la falta de experiencia y de expertos en el tema. También, dependiendo el tipo de Blockchain que decida usarse, puede haber costos diferentes en el despliegue de la red y la operación de la misma. Para ello se debe contar con los expertos adecuados y realizar un análisis profundo de la solución requerida, para determinar las características que ayudan a optimizar la red y reducir los costos de implementación y operación (Iredale, 2020).

Inmutabilidad de la Información. De la misma manera en que esto puede ser una gran ventaja, también puede ser una gran desventaja. Cuando las personas se equivocan al registrar la información, se entregarían datos erróneos que no pueden modificarse posteriormente. Lo que en este caso se puede hacer es crear una nueva información y dejar la trazabilidad del dato erróneo. Por ejemplo, en el caso de un SCE, el Gobierno u operador, quien diseña y despliega el contrato inteligente, puede agregar funcionalidades en el código que permitan realizar cambios, dejando trazabilidad inmutable de los cambios realizados en la Blockchain (Iredale, 2020).

Aspectos Regulatorios Inciertos. Especialmente cuando se habla de activos digitales como las criptomonedas y la digitalización de activos a través de la tokenización, Blockchain podría enfrentar dificultades de adopción por cuanto en la mayoría de los países no se ha definido una regulación gubernamental que establezca las condiciones de su aplicación y uso. En el caso particular de Colombia, existe el Decreto de Ley 028 de 2018 y el proyecto de Ley 268 de 2019, que buscan regular el uso de las criptomonedas y las formas de transacción de activos desmaterializados en el territorio. El MinTIC presentó también, a finales de 2020, un borrador de la Guía de Referencia para la implementación de proyectos que usan la tecnología Blockchain para el Estado colombiano (Espinosa, 2020). Sin embargo, cabe anotar que para el mercado de carbono, las unidades funcionan de manera distinta a criptomonedas tradicionales, pues ya cuentan con sus propias condiciones de aplicación y uso, respaldada en una figura jurídica.

8. Conclusiones y Recomendaciones

- A partir de los análisis de la literatura, contextualización de artículos y cálculos financieros realizados, se pudo concluir que con el desarrollo e implementación de un modelo transaccional para un SCE bajo la tecnología Blockchain se contribuye a la reducción de los costos de corrupción en el SCE de Colombia por un valor estimado de 12,98 millones de dólares a través de la transparencia en la data y un registro de información inmodificable que brinda mayor seguridad y confianza a los diferentes actores.
- El SCE implementado bajo la tecnología Blockchain contribuye a la reducción de costos de implementación y operación, al agilizar los procesos de distribución, transferencia, compensación e inventario de certificados de emisión del SCE, dado que las operaciones mismas se pueden ejecutar sin la mediación de terceros, lo cual reduce el pago de comisiones, el manejo de intermediarios y la no necesidad de robustas infraestructuras tradicionales privadas.
- El SCE en Colombia contribuye al crecimiento verde del país, el aumento de las estrategias bajas en carbono y la atracción de inversiones para un crecimiento económico resistente y sostenible. Dado el panorama actual donde por el déficit fiscal del país se requiere implementar estrategias para cubrirlo y mantener el bienestar a los colombianos menos favorecidos. También trae aumentos en la eficiencia y la productividad para los sectores energético, industrial, agrícola y forestal, beneficios para la salud gracias a una disminución de la contaminación del aire, reducción de inundaciones a través de la reforestación, así como protección de la biodiversidad y medios de vida comunitarios mediante la preservación forestal.
- La tecnología Blockchain tiene las características que permiten adaptarse a cualquier mercado financiero, para el caso de estudio el mercado de carbono porque mejora la trazabilidad de los certificados de emisión y brinda la seguridad, transparencia y la inmutabilidad de la información.
- El gobierno como actor fundamental en el diseño e implementación del SCE, debe conocer las ventajas y los beneficios que brinda la tecnología blockchain en este tipo de mercados, para ello se recomienda que la empresa XM realice la adecuada socialización de los resultados de la consultoría con los agentes encargados del gobierno. Además, el

uso de la plataforma en ambientes de prueba para mostrar la funcionalidad del modelo, antes de desarrollar operaciones reales en el mercado.

9. Bibliografía

Anderson, B., Convery, F., y Di Maria, C. (Mayo de 2011). Technological Change and the EU ETS: The Case of Ireland. IEF Working Paper, (43), <https://ssrn.com/abstract=1855495/>

Au, S., Power, T. 2018. *Tokenomics. The crypto shift of Blockchains, ICOs, and Tokens*. Birmingham, Reino Unido: Packt Publishing Ltd.

Banco Bilbao Vizcaya Argentaria [BBVA]. (5 de diciembre de 2017). *De Alan Turing al 'ciberpunk': la historia de 'blockchain'*. <https://www.bbva.com/es/historia-origen-blockchain-bitcoin/>

Banco Bilbao Vizcaya Argentaria [BBVA]. (26 de septiembre de 2018). *¿Cuál es la diferencia entre una DLT y 'blockchain'?* <https://www.bbva.com/es/diferencia-dlt-blockchain/>

Carbon Trust. (16 de Febrero de 2017). PMR Colombia: Mapa de ruta para el diseño de un Sistema de cupos de emisiones (SCE) en Colombia. <https://www.carbontrust.com/our-projects/partnership-for-market-readiness-roadmap-for-a-greenhouse-gas-emissions-trading-system>

Ortegón, E., Pacheco, J., Prieto, A. (Abril de 2015). *Metodología del marco lógico para la planificación, el seguimiento y la evaluación de proyectos y programas*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). ISSN electrónico 1680-8878 https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/5607/S057518_es.pdf

Chiavenato, I. (2007). *Introducción a la teoría general de la administración*. México: Impresores Encuadernadores, S.A. de C.V.

Dobson, R. (23 de septiembre de 2015). *Carbon market corruption risks and mitigation strategies*. 2015(11). 1-15. <https://www.u4.no/publications/carbon-market-corruption-risks-and-mitigation-strategies.pdf>

Echebarría Sáenz, M. (2017). *Contratos electrónicos autoejecutables (smart contract) y pagos con tecnología blockchain*. Revista de Estudios Europeos, 70, 69-97. <http://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/28434/Estudios-Europeos-2017-70-Contratos-electr%c3%b3nicos-autoejecutables...%2869-97%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Fu, B., Shu, Z., y Liu, X. (7 de abril de 2018). Blockchain Enhanced Emission Trading Framework in Fashion Apparel Manufacturing Industry. *Sustainability*. 10(4):1105.

<https://doi.org/10.3390/su10041105>

Funk, M. (30 de enero de 2015). *The Hack that Warmed the World*. Foreign Policy (FP).
<https://foreignpolicy.com/2015/01/30/climate-change-hack-carbon-credit-black-dragon/>

Gerente.com. (2016). *Estos son los 5 dolores de cabeza de los empresarios colombianos*.
<https://gerente.com/co/estos-son-los-5-dolores-de-cabeza-de-los-empresarios-colombianos/>

GIZ. (2019). Blockchain for Mexican Climate Instruments: Emissions Trading and MRV systems. Obtenido de https://www.climateledger.org/resources/Blockchain-Potentials-Climate-Policy_2019.pdf

González-Eguino, M. (2010). Competitividad y fuga de carbono: el caso de la economía vasca. *Basque Centre For Climate Change Klima Aldaketa Ikergai*. *Ekonomiaz* 71(2), 115-135

Heindl, P. (2012). *Transaction Costs and Tradable Permits: Empirical Evidence from the EU Emissions Trading Scheme*. Centre for European Economic Research (ZEW). Alemania.
<https://ftp.zew.de/pub/zew-docs/dp/dp12021.pdf>

International Carbon Action Partnership [ICAP]. (2019). Comercio de emisiones en el mundo: Status Report 2019. Berlin.
https://icapcarbonaction.com/en/?option=com_attach&task=download&id=625

International Carbon Action Partnership [ICAP]. (2020). Comercio de Emisiones en el mundo. https://icapcarbonaction.com/en/?option=com_attach&task=download&id=680

INTERPOL. (2013). *Guide to Carbon Trading Crime*.
<https://www.interpol.int/content/download/5172/file/Guide%20to%20Carbon%20Trading%20Crime.pdf>

Iredale, G. (17 de abril 2020). *101blockchains*. Top Disadvantages of Blockchain Technology. <https://101blockchains.com/disadvantages-of-blockchain/#prettyPhoto>

ISA INTERCOLOMBIA. (2020). <http://www.isaintercolombia.com/>

Lang, C. (20 de febrero de 2014). *REDD Monitor*. ‘Supreme Court finds Shift2Neutral issued “fake” and “Valueless” Carbon Credits. <https://redd-monitor.org/2014/02/20/supreme-court-finds-shift2neutral-issued-fake-and-valueless-carbon-credits/>

Ledezma Rodríguez, M., y Caballero Quintero, Y. (2013). Marco de análisis del mecanismo de desarrollo limpio y las oportunidades del mercado del carbono para el desarrollo de Colombia. *Producción + limpia*, 8(1), 48-79. ISSN 1909-0455
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552013000100005&lng=en&tlng=es

Ley 1819 de 2016. Por medio de la cual se adopta una reforma tributaria estructural, se fortalecen los mecanismos para la lucha contra la evasión y la elusión fiscal, y se dictan otras disposiciones. 29 de diciembre de 2016. D.O. 50.101.

Linares Barbero, M. (13 y 14 de septiembre del 2018). Trazabilidad con Blockchain. Actas del I Congreso Internacional de Ingeniería de Sistemas. Hacia la Transformación Digital, Lima, Perú http://200.11.53.159/bitstream/handle/ulima/8748/ponencia_04-Linares.pdf?sequence=3&isAllowed=y

Ludwing, V. B. (1976). *Teoría General de Sistemas*. Fondo de la Cultura Económica.
<https://cienciasparadigmas.files.wordpress.com/2012/06/teoria-general-de-los-sistemas--fundamentos-desarrollo-aplicacionesludwig-von-bertalanffy.pdf>

Macalister, T. (febrero de 2011). *European Union faces legal action over fraudulent carbon emissions trading*. The Guardian.
<https://www.theguardian.com/business/2011/feb/20/carbon-emissions-trading-market-eu>

Ministerio de Medio Ambiente. (s.f.). *REDD+ Conozca qué es el Mercado Voluntario de Carbono* <https://www.minambiente.gov.co/index.php/bosques-biodiversidad-y-servicios-ecosistemas/reduccion-de-emisiones-de-gases/conozca-que-es-el-mercado-del-carbono>

Ministerio del Ambiente. (2020). *Actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional de Colombia (NDC)*.
<https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Colombia%20First/NDC%20actualizada%20de%20Colombia.pdf>

Mason, R. (19 de enero de 2011). *The Great Carbon Trading Scandal*. The Telegraph. <https://www.telegraph.co.uk/finance/newsbysector/energy/8269907/European-carbon-market-suspended-over-fraud-fears.html>

McKinsey & Co. y Ecofys. (2006). *EU ETS Review: Report on International Competitiveness*. https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/ets/docs/report_int_competitiveness_20061222_en.pdf

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2018). *Segundo Reporte Bienal de Actualización de Colombia ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC)*. <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023848/023848.html>

Espinosa, S. (2020). *Guía de referencia de Blockchain para la adopción e implementación de proyectos en el Estado colombiano*. Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. https://gobiernodigital.mintic.gov.co/692/articles-161810_Ley_2052_2020.pdf

Miró Calatayud, M. (Mayo de 2018). *¿Cómo las empresas pueden hacer rentable la ecología gracias al blockchain?* <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/106630/MIRÓ%20-%20Blockchain%20para%20salvar%20al%20Medio%20Ambiente%3a%20¿Cómo%20las%20empresas%20pueden%20hacer%20rentable%20la%20ecol....pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Mitre Abuhayar, C., Alonso-Allende, J., Escauriaza, M., Gonzalo, J., Márquez, R., y Moreno, F. J. (11 de diciembre de 2018). *Descifrando la Blockchain*. Universidad de Navarra, Ed. *Nuevas tendencias*, (100), 33-38. <https://www.unav.edu/publicaciones/revistas/index.php/nuevas-tendencias/article/view/35187>

Motu. (2019). *Designing a prototype emissions trading system for Colombia*. *Motu Economic and Public Policy Research and Environmental Defense Fund*. New Zealand. ISSN 1177- 9047

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). *Política nacional de cambio climático (PNCC)*. <https://www.minambiente.gov.co/index.php/politica-nacional-de-cambio-climatico>

Naciones Unidas. (1992). *Convención Marco de Las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático*. <http://www.minambiente.gov.co/index.php/convencion-marco-de-naciones-unidas-para-el-cambio-climatico-cmnucc/convencion-marco-de-naciones-unidas#documentos>

Naciones Unidas. (1997). *Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Kyoto. <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>

Naciones Unidas. (2016). *Convención Marco sobre el Cambio Climático*. París. <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/spa/10a01s.pdf>

Ocampo, M. (enero de 2019). *Sistema de Comercio de Emisiones de Carbono*. ICyTU, (027), https://foroconsultivo.org.mx/INCYTU/documentos/Completa/INCYTU_18-027.pdf

Erbach, G. (2015). *Enmienda de Doha al Protocolo de Kyoto*. Servicio de Estudios del Parlamento Europeo. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2015/559475/EPRS_ATA\(2015\)559475_ES.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2015/559475/EPRS_ATA(2015)559475_ES.pdf)

Pilkington, M. (18 de septiembre de 2015). Blockchain Technology: Principles and Applications. *Research Handbook on Digital Transformations*, 225-253. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2662660

Partnership for Market Readiness (PMR) e International Carbon Action Partnership [ICAP]. (2016). *Comercio de Emisiones en la Práctica Manual sobre el Diseño y la Implementación de Sistemas de Comercio de Emisiones*. Banco Mundial, Washington, DC. Licencia: Creative Commons Attribution CC BY 3.0 IGO.

Price Waterhouse Coopers [PWC] (2011). *How to assess your green fraud risks*. <https://www.pwc.co.uk/assets/pdf/greenfraud.pdf>

Shein, E. (1987). *Consultoría de procesos: su papel en el desarrollo organizacional*. EUA: Addison-Wesley Iberoamericana.

Swan, M. (2015). *Blockchain: Blueprint for a new economy*. Estados Unidos de América: O'Reilly Media, Inc.

Carbon Trust. (16 de febrero de 2017). *Aspectos institucionales y legales para el diseño de un posible sistema de comercio de emisiones (SCE) de gases de efecto invernadero en*

Colombia: Vacíos y recomendaciones normativas e institucionales.

https://docs.wixstatic.com/ugd/4bf187_7c59de60b1a64290be03436d11c4a56a.pdf

United Nations Framework Convention on Climate Change [UNFCCC] (12 de diciembre de 2015). *Acuerdo de París*. París. United Nations Climate Change.

https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_spanish_.pdf

United Nations Climate Change. (01 de junio de 2017). *How Blockchain Technology Could Boost Climate Action*. United Nations Climate Change. <https://unfccc.int/news/how-blockchain-technology-could-boost-climate-action>

United Nations Climate Change. (23 de enero de 2018). *La ONU, a favor de la tecnología Blockchain para la acción climática*. United Nations Climate Change.

<https://unfccc.int/es/news/la-onu-a-favor-de-la-tecnologia-blockchain-para-la-accion-climatica>

United Nations Climate Change. (21 de diciembre de 2018). *El precio del carbono, herramienta cada vez más común para hacer frente al cambio climático*. United Nations Climate Change. <https://unfccc.int/es/news/el-precio-del-carbono-herramienta-cada-vez-mas-comun-para-hacer-frente-al-cambio-climatico>

Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito. [UNODC]. (2019). *Erradicar la corrupción es vital para lograr el desarrollo sostenible*.

<https://www.unodc.org/mexicoandcentralamerica/es/webstories/2019/erradicar-la-corrupcin-es-vital-para-lograr-el-desarrollo-sostenible.html>

Western Climate Initiative, Inc. [WCI, Inc.] (2019). *Annual Report, Activities and Accomplishments*. <https://wcitestbucket.s3.us-east-2.amazonaws.com/amazon-s3-bucket/documents/annualreport-2019-20200514-en.pdf>

XM. (2020). Certificaciones. <https://www.xm.com.co/corporativo/Paginas/Nuestra-empresa/certificaciones.aspx>

XM. (2020). Estructura del mercado. <https://www.xm.com.co/corporativo/Paginas/Nuestra-empresa/que-hacemos.aspx>

XM. (2020). ¿Quiénes somos? <https://www.xm.com.co/corporativo/Paginas/Nuestra-empresa/quienes-somos.aspx>

Zhu, Z., Qi, G., Zheng, M., Sun, J., y Chai, Y. (Julio de 2020). Blockchain based consensus checking in decentralized cloud storage. *Simulation Modelling Practice and Theory*. (102) <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2019.101987/>

10. Apéndices

Apéndice A. Sistema de Comercio de Emisiones (SCE) de la UE

Tamaño del SCE

El límite de las emisiones para el año 2020 es de 1,816 MtCO₂e (Millones de toneladas de CO₂) que se reduce anualmente por un factor de reducción lineal constante (actualmente 1.74% o ~ 38,3 millones de derechos de emisión). A partir de 2021 el factor de reducción crecerá a 2.2% anualmente. El número de entidades cubiertas son 10,744 centrales e instalaciones.

Distribución

Desde su creación los derechos de emisión se han distribuido usando varios métodos, entre ellos tenemos asignación gratuita y subastas. Los porcentajes de derechos de emisión que se asignan gratuitamente o se subastan, se han adaptado a lo largo de cada una de las fases de implementación del SCE.

Flexibilidad temporal

Limitadamente se ha permitido desde 2008 el almacenamiento de derechos de emisión para su uso en años siguientes (*banking*), el préstamo de derechos de emisión de periodos futuros por parte del gobierno no está permitido. De acuerdo con la legislación vigente, el uso de compensaciones no está previsto. Es importante tener en cuenta que en las primeras fases fue permitido el uso de certificados de carbono.

Estabilidad del mercado

Es la política que tiene el SCE para mantener los precios de las emisiones dentro de unos niveles estables, para garantizar esa condición se cuenta con dos mecanismos:

a) Reserva de estabilidad del mercado: El MSR (*Market Stability Reserve*) comenzó a operar en enero de 2019. Su propósito es abordar cualquier desequilibrio en la oferta-demanda de derechos de emisión que prevalecen en el mercado de carbono de la UE y para mejorar la resiliencia del SCE de la UE a futuros choques.

b) Umbrales: la Comisión Europea publica el número total de derechos de emisión en circulación (TNAC) antes del 15 de mayo. Derechos de emisión se agregarán a la reserva si el TNAC es mayor de 833 millones. Derechos de emisión se reinyectarán en el mercado si el número de derechos de emisión en circulación cae por debajo 400 millones.

Cuando el TNAC está por encima de 833 millones, 12% (24% hasta 2023) del excedente se retira de las subastas futuras y se colocan en la reserva durante un período de 12 meses. Cuando

el TNAC es inferior a 400 millones de derechos de emisión, 100 millones de derechos de emisión se toman de la reserva y se inyectan en el mercado.

Cumplimiento

El periodo de cumplimiento hace referencia al periodo limite al cual deben entregarse las emisiones verificadas del periodo anterior (del 1 de enero al 31 de diciembre inmediatamente anterior: cada año, los operadores deben presentar un informe de emisiones. Los datos para un año determinado deben ser verificados por un verificador acreditado antes del 31 de marzo del año siguiente. Una vez verificado, los operadores deben entregar el número equivalente de derechos de emisión al 30 de abril de ese año.

Monitoreo, Reporte y Verificación

Hace referencia al proceso anual en donde cada empresa debe presentar un informe de las emisiones generadas en un periodo (1 de enero al 31 de diciembre). El monitoreo es el cálculo técnico de las emisiones, realizado por la empresa o un tercero contratado por ella, el reporte es la presentación de la información al regulador (Se presenta un auto informe anual basado en plantillas electrónicas armonizadas preparadas por la Comisión Europea) y la verificación es el proceso a través del cual un tercero valida los datos contenidos en los reportes.

Sanciones

Las entidades reguladas deben pagar una multa por exceso de emisiones de 100 EUR / tCO₂ (USD 112 / tCO₂) por cada tonelada de CO₂ emitido por el cual no se ha entregado ninguna asignación, junto a la compra y entregar la cantidad equivalente de derechos de emisión. Los nombres de los operadores que no cumplan se hacen públicos. Los Estados miembros pueden aplicar diferentes sanciones para otras formas de incumplimiento.

Enlaces con otros sistemas

Tras los cambios reglamentarios finales en el diseño del SCE suizo un vínculo entre el SCE suizo y el SCE de la EU entró en vigor 1 de enero de 2020. El enlace limita un proceso de 10 años de negociaciones y acuerdos sobre alineamiento regulatorio. Comenzaron negociaciones formales en diciembre de 2010, que culminó con la conclusión de un acuerdo a fines de 2017. Ambas partes anunciaron el 12 diciembre de 2019 que el enlace entraría en funcionamiento en enero de 2020, permitiendo a las entidades cubiertas usar las asignaciones de ambos sistemas para el cumplimiento.

Uso de ingresos

En el SCE de la EU, los ingresos de la subasta de derechos de emisión pertenecen a los Estados miembros. Al menos el 50% de los ingresos deben ser utilizado para fines relacionados con el clima y la energía. Los Estados miembros están obligados a informar a la Comisión Europea sobre cómo usan los ingresos. En 2018, en promedio los Estados miembros gastaron 70% de sus ingresos en propósitos nacionales e internacionales relacionados con el clima.

Apéndice B. SCE de California

Tamaño del SCE

El sistema comenzó en 2013 con un límite de 162.8 MtCO₂e. Cuando el programa se expande para incluir la distribución de combustible, el límite aumentó a 394.5 MtCO₂e en 2015. Desde 2015 hasta 2020, el límite disminuye en aproximadamente 12 MtCO₂e cada año, alcanzando 334.2 MtCO₂e en 2020. El límite disminuye en un factor promediado de 3.1% por año en el segundo período de cumplimiento (2015-2017) y 3.4% en el tercer cumplimiento período (2018-2020). Durante el período 2021-2030, el límite disminuye en aproximadamente 13.4 MtCO₂e cada año, llegando a 200.5 MtCO₂e en 2030. El número de participantes es de aproximadamente 500 (2015-2017).

Distribución

Los derechos de emisión se distribuyen mediante subasta y asignación gratuita. Las instalaciones industriales reciben bonificaciones gratuitas por asistencia de transición y para minimizar la fuga de carbono. Para casi todas las instalaciones industriales, la cantidad está determinada por puntos de referencia específicos, cantidades de producción, un factor de ajuste de límite y un factor de asistencia basado en la evaluación de riesgo de fuga. No hay límite en el monto total de la asignación industrial. También se proporciona asignación gratuita para asistencia de transición a entidades públicas mayoristas de agua, generadores de contratos heredados, universidades, instalaciones de servicio público y a partir de 2018 instalaciones de conversión de residuos en energía.

a) Consignación: Los servicios de distribución eléctrica y natural y los proveedores de gas reciben subsidios en nombre de sus contribuyentes. Todos los servicios de gas natural y electricidad deben usar el valor de asignación para el beneficio del contribuyente y para la reducción de emisiones.

b) Subasta: En 2019, alrededor del 65% de las asignaciones de 2019 estaban disponibles a través de una subasta, incluyendo ambos derechos propiedad de CARB (alrededor del 40%) y derechos consignados a subasta por servicios públicos (alrededor del 25%). Los ingresos de las asignaciones de envío están obligados a beneficiar a los contribuyentes o contribuir a la reducción de emisiones. El resto de los derechos se asignó de forma gratuita.

Flexibilidad temporal

La banca está permitida, pero el emisor está sujeto a límite de mantenimiento general de los derechos de emisión. Pedir prestado de futuros cupos no está permitido. Las asignaciones no vendidas en subastas pasadas se eliminan de la circulación y se lanzarán gradualmente a la venta en subastas después. Es permitido el uso de compensaciones, con las siguientes restricciones, límite cuantitativo hasta el 8% del cumplimiento de cada entidad obligación hasta las emisiones de 2020; límite cualitativo, actualmente, seis tipos de compensación doméstica son aceptados como unidades de cumplimiento originadas en proyectos llevado a cabo de acuerdo a protocolos nacionales.

Desde 2020 AB 398 establece dos cambios significativos en el programa de compensación desde 2021 en adelante. En primer lugar, la proporción de compensaciones que se pueden utilizar para cumplir con la obligación de cumplimiento disminuirá al 4% entre 2021-2025 y se mantendrá en 6% a partir de entonces. Segundo, no más de la mitad del límite de uso de compensaciones después de 2020 puede provenir de compensaciones que no brindan beneficios ambientales directos en el estado de California.

Estabilidad del mercado

Precio de subasta: USD 16.68 por asignación en 2020. El precio de reserva de la subasta es el precio mínimo al que las asignaciones están disponibles en subasta, aumenta anualmente por 5% más inflación, medida por el índice de precios al consumidor.

Reserva: AB 398 requirió dos tercios de las provisiones de reserva que quedaban a 31 de diciembre de 2017, las que se utilizarán para poblar los dos puntos de contención de precios a partir de 2021. El administrador de venta de reserva puede vender asignaciones acumuladas de manera regular en tres niveles de precios iguales. Para 2020, estos precios son USD 62,29, USD 70,09 y USD 77,86. Niveles de precios que aumenta en un 5% más la inflación (medida por el Índice de precios al consumidor).

Cumplimiento

Los instrumentos de cumplimiento equivalentes al 30% de las emisiones verificadas del año anterior, deben entregarse anualmente antes del 1 de noviembre (o el primer día hábil posterior). Las emisiones restantes deben entregarse antes del 1 de noviembre del año siguiente del período de cumplimiento. Los períodos de cumplimiento son de 3 años calendario (2015-2017, 2018-2020 y así sucesivamente).

Monitoreo, Reporte y Verificación

La frecuencia de los reportes es anual. Los informes de reportes de emisiones y sus respectivos datos requieren una verificación de terceros independiente anualmente para todas las entidades cubiertas por el programa. Los informes son requeridos para la mayoría de los operadores o por encima de 10,000 tCO₂e. Los operadores deben implementar auditorías internas, garantía de calidad y sistemas de control para el programa de informes y los datos informados.

Sanciones

Una entidad cubierta que no logre cubrir sus emisiones de GEI verificadas en un plazo de entrega anual o al final de un periodo de cumplimiento debe entregar cada derecho de emisión faltante y tendrá que entregar tres derechos adicionales para cada derecho de emisión de cumplimiento que no logró cumplir.

Enlaces con otros sistemas

California se vinculó con el ETS de Québec el 1 de enero de 2014. Los dos ampliaron su mercado conjunto vinculándose con Ontario el 1 de enero de 2018 hasta la terminación del sistema de Ontario a mediados de 2018.

Uso de ingresos

La mayor parte de los ingresos de California van al Fondo de Reducción de Gases efecto invernadero, del cual al menos el 35% debe beneficiar comunidades desfavorecidas y de bajos ingresos. El fondo también invierte los ingresos en proyectos que reducen las emisiones de GEI.

Apéndice C. Presupuesto de SCE Soportado en la Tecnología Blockchain

La plataforma transaccional contempla las actividades de:

* Mercado primario (Creación de derechos de emisión (CAP)).	# Participantes	920
* Distribución de tokens hacia las billeteras de los participantes (Subastas). Mercado secundario (Exchange descentralizado y mercado OTC entre los participantes)	# Transacciones anuales	1.857
* Reportes de emisión (Presentación y aprobación o rechazo).		
* Inclusión de bonos del mercado voluntario.		
* Monitoreo de transacciones, seguimiento de derechos de emisión y cumplimiento de metas de reducción.		
* Interoperabilidad entre SCE.		
* Contabilidad, trazabilidad, compensación de derechos de emisión con mediciones de CO2 reportadas por las empresas.		

Implementación	Costo Annual USD	Descripción
Plataforma transaccional Blockchain	\$ -	La Blockchain misma es la plataforma transaccional
Contratos Inteligentes (<i>Smart Contracts</i>)	\$ 3.500	Escribir el código y despliegue de contratos en la red pública
Aplicación administrativa del Gobierno	\$ 7.500	Aplicaciones para interactuar con la red Blockchain y los contratos inteligentes.
Aplicaciones de verificadores	\$ 7.500	Aplicaciones para interactuar con la red Blockchain y los contratos inteligentes.
Aplicaciones de emisores	\$ 7.500	Aplicaciones para interactuar con la red Blockchain y los contratos inteligentes.
Billeteras mercado secundario	\$ -	Se pueden usar protocolos y billeteras existentes y abiertos para almacenar, transferir e intercambiar los derechos de emisión.
Infraestructura		
Nodos blockchain	\$ 903	Es recomendado correr un nodo propio a que las aplicaciones envían las transacciones que generan. 75,26 USD mes.
Módulo de seguridad de <i>hardware o secret/key managers</i>	\$ 12.696	Es recomendado que el gobierno use un HSM (<i>hardware security modul</i>) para tener mayor seguridad de las llaves con que se emiten los tokens. 1058 mes.
Servidores y servicios para las aplicaciones	\$ 3.463	Para las 3 aplicaciones del gobierno, los verificadores y las empresas. 288,62 mes.
Almacenamiento de reportes y certificaciones	\$ -	Se puede usar IPFS que es una red descentralizada de almacenamiento de documentos, es completamente abierto y gratis.
Administración, mantenimiento y soporte		
Personal desarrollo tecnológico y soporte al cliente	\$ 48.000	Dos personas expertas en Blockchain aproximadamente.
Operaciones		
Auditoría	\$ -	Porque todo está digitalizado y pueden ser parte de las mismas aplicaciones administrativas de los actores. La misma red garantiza la integridad y trazabilidad de la información.
Uso		
Costo de transacción (<i>transaction fees</i>)	\$ 724	Costo promedio en dólares por cada transacción en la red Ethereum (https://network-charts.coinmetrics.io/) 0,39 USD por transacción
Total	\$91.787 USD	

***Este valor no incluye costos de servicios, costos financieros, ni otros costos no contemplados que sean necesarios .

Apéndice D. Prototipo SCE Soportado en Blockchain de Ethereum

Las transacciones son reales y se pueden verificar de manera abierta. Quedando registro de hora y fecha de cada transacción y las cantidades involucradas en cada una de ellas. Es una red de pruebas en la red *ropsten*.

- Token (ERTCOL EmissionRightsTokenColombia) representa los derechos de emisión emitidos por el Gobierno.

<https://ropsten.etherscan.io/token/0x431Ac70c90f8FF6654053Ee5e058b86f8C637251>

Muestra la cantidad de derechos de emisión creados, los poseedores y las transferencias realizadas.

- Token (COP ColombianPesoToken) representa pesos colombianos emitidos por una entidad bancaria a la red blockchain. Se usan para los intercambios de ERTCOL dentro de la red de manera descentralizada.

<https://ropsten.etherscan.io/token/0x6B272f5FB64e4AA352B277E466eB6Ef1aF42A1C8>

Muestra la cantidad de pesos digitales emitidos, los poseedores y las transferencias realizadas.

- Billeteras creadas en <https://metamask.io/>. Cada dirección representa una empresa o participante del SCE, se muestra el saldo actual de ERTCOL y COP, al igual que las transacciones entrantes y salientes con sus montos y registro de tiempo.

<https://ropsten.etherscan.io/token/0x431ac70c90f8ff6654053ee5e058b86f8c637251?a=0xf41A5723283c392643b3144C70dD02b9ab16F9C5>

<https://ropsten.etherscan.io/token/0x431ac70c90f8ff6654053ee5e058b86f8c637251?a=0x85edE713f694c1719E4B702158E401E943136793>

<https://ropsten.etherscan.io/token/0x6b272f5fb64e4aa352b277e466eb6ef1af42a1c8?a=0xef15b5fec18c4415c6d7472764f327df16d1a24>

- Contrato para ofertas de compra y venta de ERTCOL. Por medio del cual se puede publicar ofertas de compra y venta, incluso las mismas subastas se puede realizar con este contrato. Usando el token COP se garantiza que la compra y venta sea automática, transparente, segura y sin intermediarios. Además, la información es pública.

<https://ropsten.etherscan.io/address/0xaCcb10845D4bb21165A641D76030461D4c2026a0>

- Contrato para presentación de reportes de emisión. Por medio del cual la empresa presenta su reporte de emisión y a través de la red es validado por el verificador y el

Gobierno. Así mismo, en este contrato se hace la compensación de las emisiones con la destrucción de los ERTCOL equivalentes.

<https://ropsten.etherscan.io/address/0x5bf6747107e679c6d4cbf55c7ab81d2563fbe696>

- Reporte de emisión. Ejemplo de un reporte de emisión cargado en IPFS (*InterPlanetary File System*), una red de documentos pública. Al copiar el identificador del documento en ipfs y usarlo como dato de entrada en la transacción del reporte de emisión en Blockchain, se garantiza la transparencia e inmutabilidad en el contenido del reporte.

<https://ipfs.io/ipfs/Qmc5FBvnW2tBq6GZtechbZvVcLPdaWf4q5azon2g2bTUNn?filename=Reporte-emission-28feb.pdf>

Apéndice E. Carta de Empresa Avalando Consultoría



1112 – 11

Señores
UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
FACULTAD DE CIENCIAS ECONÓMICAS
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS ECONÓMICAS
 Ciudad

Motivo: acta de finalización de la consultoría

Respetados señores:

XM S.A. E.S.P. certifica que los estudiantes de la Maestría en Finanzas Santiago Vallejo Toro, con CC 1.036.949.393, y Edwin Valencia Toro, con CC 98.570.374; finalizaron exitosamente la consultoría denominada “*Propuesta de un Modelo para un Sistema de Comercio de Emisiones en Colombia soportado en la tecnología blockchain: una mirada desde los costos operacionales y los costos de corrupción*”

Los estudiantes cumplieron con el objetivo principal del proyecto, el cual identificó los beneficios y posibles desventajas que plantea la utilización de la tecnología blockchain para la operación de un sistema de comercio de emisiones, teniendo en cuenta diversas variables como los costos operativos, los costos de corrupción, las características de la tecnología, sus mecanismos de implementación, entre otros. El estudio confirma las oportunidades que la tecnología blockchain ofrece para la confiabilidad y costo-efectividad de este tipo de mercados.

Poca literatura se encuentra disponible en el mundo sobre sistemas de comercio de emisiones y blockchain. Sin duda alguna, este estudio servirá de guía para los países y jurisdicciones que cada vez más están diseñando y operando este tipo de mercados de carbono.

Cordialmente,

ANA MERCEDES RESTREPO MÚNERA
 Dirección Estrategia e Innovación

Elaboró y Aprobó: Camilo Trujillo