

Disertación Doctoral en Estudios Ambientales y Rurales

Jurado

Dr. Luis Jesús Belmonte Ureña

Dr. Andrés Etter Rothlisberger

Dr. Duarcides Ferreira Mariosa

Modelo de eficiencia ambiental de las Soluciones Climáticas
de la Naturaleza (NCS) basado en los precios de los
mercados de carbono

Director, Dr. Juan Fernando Álvarez Rodríguez

Candidato Doctoral, Michel Casas-Cuestas

Julio 2024

ARTÍCULO 23, RESOLUCIÓN #13 DE 1946.

“La Universidad no se hace responsable por los conceptos emitidos por sus alumnos en sus trabajos de tesis. Sólo velará porque no se publique nada contrario al dogma y a la moral católica y porque las tesis no contengan ataques personales contra persona alguna, antes bien se vean en ellas el anhelo de buscar la verdad y la justicia”

Contenido

- Contenido..... 2
- Indice de Figuras..... 4**
- Indice de Tablas..... 5**
- Resumen 6**
- Capítulo I. Introducción..... 9**
 - 1. 1 Problema de investigación 10
 - 1.2 Preguntas de investigación 10
 - 1.3 Objetivo general 11
 - 1.4 Objetivos específicos 11
 - 1.5 Significancia 11
- Capítulo 2 Marco Conceptual..... 12**
 - 2.1 Capital Ambiental..... 13
 - 2.2 Capital financiero 14
 - 2.3 Capital Social 17
 - 2.4 Capitalización de los activos 20
 - 2.5 Balance del carbono..... 21
 - 2.6 El riesgo sistémico financiero y el cambio climático..... 22
 - 2.7 Punto de equilibrio y costo de oportunidad 22
 - 2.8 Los principios de diseño organizacional de Elinor Ostrom 23
- Capítulo 3 Enfoque Metodológico 24**
- Capítulo 4 Los mercados de carbono y el cambio climático 27**
 - 4.1 Necesidades energéticas globales 27
 - 4.2 Concentración de los gases de efecto invernadero en la atmósfera..... 28
 - 4.3 Anomalías en la temperatura por las emisiones de gases de efecto invernadero 29
 - 4.4 El costo financiero y el riesgo sistémico del cambio climático 30
 - 4.5 El capital social y el cambio climático 32
 - 4.6 Precios Globales del Carbono CO₂e..... 33
 - 4.7 Proyecciones 36
- Capítulo 5 Modelo de eficiencia ambiental basado en los precios del carbono como función de la tasa de absorción y la capacidad de almacenamiento de las soluciones climáticas de la naturaleza 40**
 - 5.1 Balance global del carbono 40

5.2 Soluciones tecnológicas para la mitigación y compensación de las emisiones de efecto invernadero	41
5.3 Potencial de las soluciones climáticas de la naturaleza ($SCO2e + \Delta CO2e$)	42
5.4 Modelo de eficiencia ambiental basado en los precios del carbono $CO2e$ en función de la tasa de absorción y la capacidad de almacenamiento de las soluciones climáticas de la naturaleza.	47
5.5 Escenarios	48
Capítulo 6 Las iniciativas ambientales solidarias en Colombia bajo el marco de los principios del diseño organizacional de Elinor Ostrom.....	54
Capítulo 7 Discusión, conclusiones y recomendaciones	72
Referencias bibliográficas	77
Anexo 1: El rol potencial del Capital Social en la adaptación al cambio climático a través de las soluciones basadas en la naturaleza	84
Anexo 2: ¿How much and for how long could the annual cost of atmospheric greenhouse gas ($CO2e$) abatement between 1960-2020 through carbon pricing be estimated?.....	107
Anexo 3 The economic potential of carbon pricing to abate emissions generated between 1960 and 2020 through Natural Climate Solutions	122

Indice de Figuras

Figura 1 Capital ambiental y el costo de la incertidumbre sobre los recursos naturales.....	12
Figura 2 Los mercados de carbono y los capitales ambiental, social y financiero	13
Figura 3 Mapa conceptual de los Activos Ambientales, Sociales y Financieros	21
Figura 4 Fuentes de Energía por Volumen de Generación en Tera vatios hora TW/h.....	27
Figura 5 Concentraciones de Dióxido de Carbono (CO ₂) medido en partes por millón PPM.....	28
Figura 6 Anomalías en la Temperatura por Región y Global	29
Figura 7 Precios del carbono, cobertura en las emisiones e ingresos generados.....	35
Figura 8 Marco teórico de los mercados de carbono basados en la sostenibilidad energética de los capitales ambiental, financiero y social	36
Figura 9 Principales emisores de Dióxido de Carbono	40
Figura 10 Índice de Densidad del Área Forestal en el año 2015.....	44
Figura 11 Capital financiero, productividad y costo del cambio climático	49
Figura 12 Costos estimados por eventos climáticos extremos en los Estados Unidos	50
Figura 13 Precios del carbono en función del potencial de las soluciones climáticas de la naturaleza <i>PCO_{2e} (SCO_{2e} + ΔCO_{2e})</i> para un periodo de 30 años satisfaciendo los costos de oportunidad <i>OK</i>	53
Figura 14 Países con el mayor número de especies de árboles en el planeta	55
Figura 15 Dinámica Histórica de la deforestación en Colombia (hectáreas por año)	57
Figura 16 Mapa Teórico 1	61

Indice de Tablas

Tabla 1 Dimensiones del capital financiero enfocado en la sostenibilidad	17
Tabla 2 Matriz de eficiencia ambiental en función de los precios del carbono	31
Tabla 3 Años requeridos para el abatimiento de 319 gigatonnes de CO ₂ e a través de las soluciones climáticas de la naturaleza	37
Tabla 4 Capacidad de absorción de CO ₂ e en función de las extensiones de bosques restaurados	38
Tabla 5 Potencial de creación de empleo de la Soluciones Climáticas de la Naturaleza	39
Tabla 6 Costo anual de las soluciones climáticas de la naturaleza en función de la mitigación de CO ₂ e por año	39
Tabla 7 Presupuesto del Balance Global de Dióxido de Carbono CO ₂ e 1959-2019	41
Tabla 8 Escenarios Globales IPCC 2081-2100 sobre las proporciones de dióxido de carbono absorbidas por la atmosfera, los suelos y los océanos	43
Tabla 9 Periodos del potencial de la restricción a la deforestación y la reforestación de las soluciones climáticas de la naturaleza $SCO_2e + \Delta CO_2e$	51
Tabla 10 Gigatonnes almacenados anualmente conforme al número de hectáreas y las tasas de absorción de bosque	52
Tabla 11 Precios del carbono PCO_2e en función del potencial de las soluciones climáticas de la naturaleza ($SCO_2e + \Delta CO_2e$)	53
Tabla 12 Extensiones generales de las coberturas	56
Tabla 13 Extensiones de suelos afectadas por la erosión	56
Tabla 14 Extensiones de bosque en Colombia por regiones	56
Tabla 15 Uso financiero del suelo en Colombia	59
Tabla 16 Principales países participantes de los mercados de carbono	59
Tabla 17 Variables Situacionales	61
Tabla 18 Principios de Diseño Organizacional de E. Ostrom	62
Tabla 19 Variables Situacionales de E. Ostrom	62

Resumen

Para el presente documento de disertación doctoral ha sido *expuesto el modelo de valoración de los precios en los mercados de carbono en función de las variables ambientales de la tasa de absorción y la capacidad de almacenamiento de los gases de efecto invernadero*, conforme a las soluciones climáticas de la naturaleza. El modelo fue enmarcado dentro de las teorías aplicadas a la valoración de los certificados del carbono *CO₂e*, el estado del arte de los instrumentos financieros y la referencia a la experiencia empírica local como referente al contexto de los proyectos ambientales.

En el *primer capítulo* ha sido expuesta la introducción donde son presentados el problema de investigación, las preguntas de investigación, el objetivo general, los objetivos específicos, el planteamiento del modelo y su significancia.

En el *segundo capítulo* se ha presentado el marco conceptual, donde han sido clasificados los mercados de carbono según lo que ha sido definido como los capitales ambiental, social y financiero. Lugar donde han sido descritos los elementos empleados con el objeto de hacer la identificación sobre las interrelaciones entre los conceptos y su incidencia en los mercados de carbono, atendiendo a la perspectiva del lector interesado en el proceso de modelación a partir de la aproximación realizada a cada capital. Como producto, en el **Anexo 1** aparece el artículo publicado¹ sobre el relacionamiento entre el rol del capital social y las actividades ambientales donde fue resaltado el potencial de los mercados de carbono respecto a las iniciativas de la economía social y solidaria. Dado que en la literatura académica los referentes hasta ese momento eran escasos a pesar de las directrices multilaterales sobre su relevancia en la ejecución de los proyectos. Con ello fue posible destacar los elementos conceptuales y teóricos que constituyen el documento de disertación, de manera tal que lograra acercar al lector no especializado a los métodos y resultados propuestos.

En el *tercer capítulo* fue observada la metodología conforme a las dos etapas de la investigación, donde en primer orden se realizaron los alcances correlacionales, descriptivos y finalmente explicativos del fenómeno del cambio climático, en función de los precios de los mercados de carbono. Posteriormente en la segunda etapa cualitativa fue aplicada la metodología

¹ El rol potencial del capital social en la adaptación al cambio climático a través de las soluciones basadas en la naturaleza. Casas-Cuestas M. Revista CIRIEC Colombia (2023)

del diseño organizacional planteada por Elinor Ostrom a las iniciativas ambientales solidarias como resultado de la investigación exploratoria sobre la incipiente actividad de los mercados de carbono a nivel local.

Luego en el *cuarto capítulo*, ha sido expuesto el estado del arte sobre los mercados del carbono, donde se hace el recorrido sobre su desarrollo temprano bajo el entendimiento de su carácter global. Con ello al lector le han sido presentadas las fuentes primarias de información sobre los mercados, las cuales han realizado las actualizaciones periódicas respecto al estado, alcance y dinamismo de los agentes de los mercados en función de la problemática del cambio climático. Asimismo, se han encontrado los hallazgos preliminares de la investigación sobre las dimensiones espacio-temporales y las potencialidades económicas de los mercados de carbono según lo planteado en los artículos sometidos a divulgación editorial, **Anexo 2 y Anexo 3**.²

Respecto al *quinto capítulo*, ha sido postulado el modelo de valoración teórico de los precios del carbono para los mercados de capitales financieros en función de las variables ambientales de: la tasa de absorción y la capacidad de almacenamiento. Como resultado expuesto a la discusión académica y la herramienta para el avance en la profundización del alcance de los mercados de carbono para las soluciones climáticas de la naturaleza.

En el *sexto capítulo*, es presentada la experiencia *in situ* de las iniciativas ambientales de las organizaciones solidarias en Colombia, que entre sus líneas operativas han optado por la participación en los mercados de carbono. Dicha selección se hizo basada por la caracterización del sector de la economía social y solidaria, donde las organizaciones participaban en la ejecución y acompañamiento a las iniciativas ambientales y que a su vez mantuvieran el rol de liderazgo regional, conforme a su incidencia económica por el tamaño de los activos (superiores a un millón de dólares). Así bajo el marco metodológico de Elinor Ostrom, fue aplicada la validación cualitativa del diseño organizacional requerido para el desarrollo de las acciones colectivas en favor de los proyectos ambientales. Para lograrlo se realizó la verificación de los principios de diseño organizacional y el uso de las variables situacionales, según la metodología expuesta por la autora en su libro *Governing the Commons* (Ostrom, 2015). Lugar donde dichos principios propenden por

² **Anexo 2** "How much and for how long could the annual cost of atmospheric greenhouse gas (CO₂e) abatement between 1960 and 2020 through carbon pricing be estimated?" artículo sometido a revisión en la revista *Discover Environment*. **Anexo 3** "The economic potential of carbon pricing to abate emissions generated between 1960 and 2020 through Natural Climate Solutions" artículo sometido a revisión en la revista *Discover Sustainability*.

la longevidad y la asociatividad en la gestión de los recursos de uso común. Siendo la justificación de la evidencia empírica entre los relacionamientos ambientales y las estrategias de sostenibilidad.³

Finalmente, fueron presentadas a manera de sumario las conclusiones con los aportes propios de la disertación doctoral a la literatura académica, las recomendaciones derivadas de los hallazgos de la investigación para los practicantes del mercado y la discusión eventual de los resultados.

³ **Capítulo 6** “Las iniciativas ambientales solidarias en Colombia bajo el marco de los principios del diseño organizacional de Elinor Ostrom” artículo sometido a revisión a la revista Sustainability.

Capítulo I. Introducción

El cambio climático es la realidad que afronta la humanidad en el inicio del siglo XXI, siendo la consecuencia de los desarrollos tecnológicos en favor de la oferta por mejores productos y servicios. En razón a ello las dinámicas ambientales han evidenciado su alteración en función de los avances antropogénicos, por lo cual ha sido imperativo realizar la propuesta de las soluciones que permitan la salvaguarda al ecosistema global, debido a que ha sido el medio de servicio para la regulación, el soporte, la cultura y la provisión del planeta.

Con ello entre las múltiples estrategias de la sostenibilidad, se han originado los mercados de carbono como respuesta a los eventos del cambio climático los cuales han establecido la tendencia ascendente en su frecuencia generando consecuencias en la temperatura, los niveles de los mares y la disponibilidad del agua potable, entre otros (A. Dlugolecki, 2008; A. F. Dlugolecki, 1992). Así los mercados de carbono a pesar de su reciente incursión en los mercados de capitales han logrado posicionarse como una de las principales herramientas de mitigación para el fenómeno, razón por la que ha sido posible realizar la investigación sobre las incidencias prematuras que podría estar manifestando su desarrollo (Harvey et al., 2018).

Donde uno de los elementos dentro de los mercados que podría ser objeto de estudio es el correspondiente a los precios, donde se esperaba que el ejercicio de la oferta y la demanda consolidaría la formación de los precios, sin embargo, no se ha logrado dar por lo que se ha considerado como uno de los mayores retos para la profundización de los mercados de carbono (Metcalf, 2023). Así la presente disertación plantea los elementos conceptuales y metodológicos para el abordaje del modelo de precios que permite la conjunción de las variables ambientales en favor de los objetivos de mitigación de los gases de efecto de invernadero. Requiriendo la comprensión de las dimensiones de los objetivos de los mercados de carbono los cuales alcanzan horizontes de escala global y por periodos que superan los ciclos generacionales, por lo que se ha requerido una aproximación diferente a la exclusivamente financiera (Stoddard et al., 2021).

De esta manera, se ha realizado la aproximación a las soluciones climáticas basadas en la naturaleza, las cuales han demostrado tener el mayor potencial de mitigación del cambio climático en términos de la eficiencia económica y ambiental. Por lo que su comprensión desde la literatura académica ha permitido establecer las dinámicas robustas en la gestión del balance del carbono como uno de los objetivos de los mercados. Luego las extensiones del objetivo de las soluciones

climáticas basadas en la naturaleza, exigen la cobertura de territorios que en su mayoría corresponden a la propiedad colectiva o estatal (IPCC, 2018), por lo que las implicaciones del desarrollo de las estrategias de sostenibilidad establecen como requisito la inclusión de los elementos sociales hacia el favorecimiento de las poblaciones que habitan los lugares objeto de conservación y restauración.

Por lo anterior la disertación se ha realizado desde las tres áreas del conocimiento bajo el marco de los estudios ambientales y rurales, *de facto* los capitales ambiental, financiero y social. Con el ánimo de expandir las aproximaciones conforme a las dimensiones espacio-temporales y generar una discusión de mayor alcance propendiendo por la contribución teórica a la profundización de los mercados de carbono y los objetivos propios a su naturaleza.

1. 1 Problema de investigación

Los mercados de carbono aún son opacos y dispersos en razón a la diversidad de estándares y metodologías, respecto a su objetivo de mitigación y almacenamiento de los gases de efecto invernadero, lo que ha dificultado la estandarización de los precios, la priorización de las soluciones y la consideración a los contextos para las políticas públicas (Rosenbloom et al., 2020).

1.2 Preguntas de investigación

¿Bajo cuales parámetros se podría estimar eficiencia ambiental de las soluciones climáticas basadas en la naturaleza a partir de los precios de los mercados de carbono? (*Capítulo 4*).

¿Cuál podría ser la tendencia estadística entre los precios de los mercados de carbono en función de los volúmenes de absorción y la capacidad de almacenamiento de las soluciones climáticas basadas en la naturaleza? (*Capítulo 5*).

¿Cómo podría la metodología de diseño organizacional planteada por Elinor Ostrom y sus variables situacionales aproximarse a la gestión de las soluciones climáticas basadas en la naturaleza? (*Capítulo 6*).

1.3 Objetivo general

Analizar los mercados de carbono a partir de los precios en función de las variables ambientales de la tasa de absorción y la capacidad de almacenamiento de los gases de efecto invernadero, como la base para la formulación del modelo teórico de valoración de las soluciones climáticas basadas en la naturaleza dentro de los escenarios de la sostenibilidad.

1.4 Objetivos específicos

- a) Definir las variables ambientales que podrían determinar los precios de los mercados de carbono. *(Capítulo 4)*.
- b) Modelar las tendencias de los precios para los mercados de carbono basados en las soluciones climáticas basadas en la naturaleza. *(Capítulo 5)*.
- c) Identificar el potencial financiero de los mercados de carbono en función de las variables ambientales y los costos de oportunidad del uso del suelo. *(Capítulo 5)*.
- d) Explorar las iniciativas ambientales en Colombia desde una aproximación organizacional. *(Capítulo 6)*.

1.5 Significancia

El cambio climático hace parte de la agenda global de la sostenibilidad, lugar donde los mercados de carbono han logrado posicionarse como uno de los principales medios para contrarrestar el fenómeno.

Sin embargo, la determinación de sus precios de comercialización aún no ha logrado estandarizarse, dificultando la formulación de los proyectos que permitan el crecimiento del mercado, así como la visibilidad requerida para generar los intercambios básicos entre la oferta y la demanda, basado en el desarrollo del mercado secundario el cual incluye elementos de suficiencia basado en los factores de liquidez y el acceso a las plataformas de los mercados internacionales de capitales.

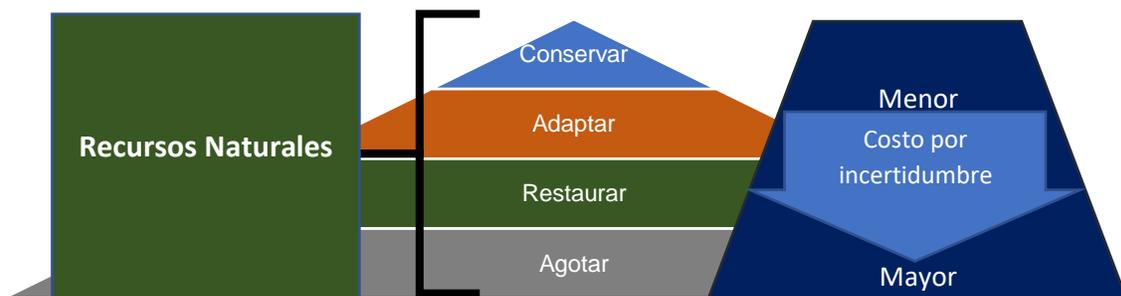
Por lo anterior, la presente disertación contribuye al entendimiento sobre la dinámica entre las principales variables ambientales para la gestión del cambio climático y postula un modelo de precios para la discusión académica sobre las soluciones climáticas basadas en la naturaleza.

Capítulo 2 Marco Conceptual

En el marco conceptual son presentados los componentes del problema de investigación conforme a la incidencia del cambio climático sobre los capitales ambiental, financiero y social. Dando como resultado la capitalización de los activos, los cuales han favorecido las capacidades de adaptación y resiliencia al fenómeno climático, dada la disponibilidad de los bienes y los servicios, los cuales representan un rol decisivo en la determinación de las opciones y las estrategias de vida de las poblaciones (Dulal et al., 2010). Lugar donde los mercados de carbono podrían tener cierta incidencia en los relacionamientos de la compensación al buscar favorecer el bienestar de la especie humana a un costo óptimo del uso de los capitales ambiental, social y financiero.

A continuación, en la **Figura 1** es presentado el escenario de los costos asociados al capital ambiental respecto al uso de los recursos naturales. Donde se ha logrado vislumbrar las estrategias de protección de los recursos de la naturaleza, lo que ha conllevado al establecimiento de los objetivos de desarrollo sostenible, los cuales han representado un costo cada vez mayor en la medida que los ecosistemas han sido degradados. Particularmente, conforme a la incertidumbre generada por la multiplicidad de los efectos del cambio climático y la disminución en la calidad de los servicios ecosistémicos provistos por los suelos y los océanos.

FIGURA 1 CAPITAL AMBIENTAL Y EL COSTO DE LA INCERTIDUMBRE SOBRE LOS RECURSOS NATURALES

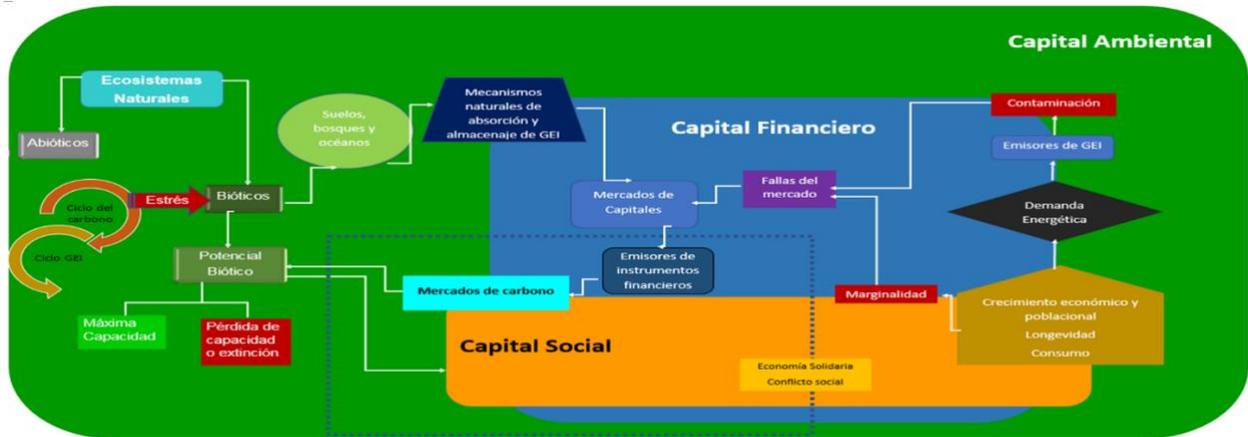


Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 2** es identificada la interacción de las soluciones climáticas de la naturaleza (suelos, bosques y océanos) dentro del capital ambiental, las necesidades de provisión y energía para el capital social y la intersección con el capital financiero; lugar donde han sido situados los mercados de carbono al tener un objetivo explícitamente ambiental en función del costo de la mitigación de los gases de efecto invernadero en favor de la especie humana. Donde el objetivo ha sido subsanar las fallas de los mercados y adaptar las políticas de desarrollo al potencial biótico del

ser humano, lo que ha requerido volúmenes significativos de energía y recursos para lograrlo, generando a su vez la descompensación de los ecosistemas y las pérdidas en biodiversidad.

FIGURA 2 LOS MERCADOS DE CARBONO Y LOS CAPITALES AMBIENTAL, SOCIAL Y FINANCIERO



Fuente: Elaboración propia.

2.1 Capital Ambiental

El capital ambiental definido como el conocimiento generado por la comprensión de la interdependencia entre la vida y la Tierra vinculando sus diversos sistemas (Karol & Gale, 2004); enmarcado bajo la incertidumbre científica, ha observado la tendencia por un mayor costo en función inversa a los abordajes de la conservación y el agotamiento de los recursos, lo que ha hecho necesario la proposición de las soluciones contenidas en las dimensiones de las anomalías identificadas por los efectos del cambio climático.

Igualmente debido a los fenómenos de interrupción del desarrollo humano, se ha dado la reflexión sobre el capital ambiental basado en la *ecología*, promoviendo la noción de proximidad a la *compreensión* de las relaciones entre los constituyentes bióticos y abióticos de la naturaleza (Karol & Gale, 2004). Extendiéndose a la cobertura de las temáticas ambientales a través de la acumulación rizomática de los conocimientos obtenidos por los métodos científicos y trascendentales; donde han sido formulados los elementos de suficiencia para la descripción de las situaciones concretas, en referencia a los eventos del cambio climático, la contaminación y la polución (Brundtland, 1987; Homer-Dixon, 1991). Requiriendo la adopción de las respuestas metódicas que podrían permitir la aproximación a su *significancia* dentro de la complejidad

ambiental. Para el caso particular de la disertación, se ha realizado la postulación del modelo de precios de carbono en función de las variables ambientales de la gestión del cambio climático.

Finalmente, el cambio climático ha afectado la temperatura, la disponibilidad del agua, los niveles de luminosidad y los constituyentes atmosféricos; lo que ha generado cambios en los procesos bióticos de las plantas impactando su productividad y calidad nutricional (Leisner et al., 2023). En consecuencia, se ha observado una mayor severidad en las quemaduras y los cambios en los bosques (Sturrock et al., 2011)(Dale et al., 2000). Por ello se ha buscado generar las estrategias para la protección y la restauración de los ecosistemas *per se*: el monitoreo, la proyección, la planeación y la mitigación (Flannigan et al., 2000) por la búsqueda de salvaguardar la estructura, la composición y la función de los bosques a través de las soluciones climáticas basadas en la naturaleza.

2.2 Capital financiero

El capital financiero comprende los activos valorados en monedas oficiales emitidas por los bancos centrales, siendo estos reconocidos por los mercados públicos de intercambio de títulos valores, entre los que se encuentran los bonos estatales, los bonos corporativos, las participaciones empresariales, los fondos fiduciarios, los *carbon offsets*, los bonos verdes, etc. Para estos activos fue establecido para sus valoraciones la inclusión del *riesgo sistémico*, entendido como el factor de disrupción potencial del sistema financiero que en su conjunto asume los efectos negativos sobre la economía real (CFA Institute; CERES, 2020).

Específicamente para la problemática ambiental, en 1991 Michael Porter planteó el conflicto entre la protección ambiental y la competitividad económica como una falsa dicotomía, conceptualizándose como la hipótesis de Porter. Donde fue expuesto el desempeño superior de las economías de Japón y Alemania, conforme a la formulación temprana en la regulación ambiental soportada por la innovación y la productividad. De esta manera fortalecieron la ventaja competitiva al lograr reducir la incertidumbre sobre las inversiones en sus economías (Porter, 1991). Similarmente, en 1992 Andrew Dlugolecki (participante del grupo del IPPC que recibió el premio Nobel en 2007) reiteró sobre la incertidumbre generada por el calentamiento global inducido por las actividades humanas, luego de haber proyectado el aumento de las temperaturas entre 2.5°C y 3.5°C, así como el aumento en el nivel del mar en 30 centímetros para Escocia e Inglaterra para el año 2050. Por esto le advirtió al sector asegurador internacional sobre su exposición al aumento en

la frecuencia de los eventos climáticos y la necesidad por generar mayores reservas para su manejo (A. F. Dlugolecki, 1992).

Por lo anterior en la discusión académica, se ha dado la afinidad entre las redes de los negocios y los ecosistemas biológicos para el entendimiento de los conceptos y los elementos comunes. Donde fuese destacado que los competidores líderes proveen las herramientas necesarias para el desarrollo de su entorno, basado en la provisión a los ecosistemas organizacionales logrando así extender las fronteras de las redes empresariales (Lansiti & Levien, 2004). Por ejemplo, los conceptos de la inversión y la rentabilidad han sido trasladados al entorno y adoptados por la incubación de nuevos agentes del mercado; como ha sucedido con los proveedores, los consumidores e incluso los reguladores. De este modo fue posible evaluar la supervivencia de los miembros del ecosistema en los mercados (Lansiti & Levien, 2004); donde la competencia podría facilitar la identificación de los puntos de convergencia entre la estrategia competitiva y el entorno empresarial.

En particular, el cambio climático ha sido reconocido por los organismos multilaterales como la falla primaria de la economía de mercado para el desarrollo sostenible y la distribución óptima del capital (Nicholas Stern et al., 2017). Esto por ejemplo, como resultado de la falla global de los gobiernos por incluir los costos sociales y ambientales dentro de las ganancias y pérdidas de las compañías. Sumado a la incompatibilidad entre las decisiones corporativas de corto plazo, que se han basado en la minimización de los costos de capital frente a los horizontes del largo plazo de las inversiones (Waygood, 2015; EU Sustainable Finance 2017). Lo que ha generado en ocasiones efectos perjudiciales al restringir las rentabilidades en su perdurabilidad y solidez (Nicholas Stern et al., 2017). Como ejemplo, en la primera mitad del 2013 las catástrofes por la acción humana o natural resultaron en las pérdidas por \$56 billones de dólares y la cobertura por la industria de seguros en \$17 billones de dólares, destinada principalmente a los desastres relacionados con las inundaciones (Waygood, 2015). Exponiendo su alto costo y la dificultad por compensar las consecuencias.

A nivel global, la Agencia Internacional de Energía estimó necesaria la inversión anual de un trillón de dólares para el periodo de 2012 a 2050 con el objetivo de mantener el aumento de la temperatura global por debajo de los dos grados Celsius. De forma similar, la Agencia CERES calculó \$44 trillones de dólares en inversiones para las energías limpias por 35 años a partir del año 2016 (UNEP, 2016); para el cumplimiento del acuerdo de 200 países que en el 2015 buscaban limitar dicho

aumento a 1.5 grados Celsius, dado que este fenómeno afectaría a las poblaciones más pobres con la reducción de los rendimientos agropecuarios y la disminución en la producción de alimentos (Nicholas Stern et al., 2017). Incluso la industria aseguradora argumentó que un aumento de 4 grados Celsius en este siglo sería insostenible para su propio funcionamiento (EU Sustainable Finance, 2018), así como la Revista *The Economist* estimó los valores en riesgo para los mercados de capitales por eventos relacionados al clima, entre los 4 y los 14 trillones de dólares (The Economist, 2015).

Ante dicho panorama, la Unión Europea ha buscado el liderazgo en las finanzas verdes las cuales se han encontrado con un déficit por el monto de \$177 billones de Euros de las inversiones por año para el período de 2021 a 2030, para un total de \$1.77 trillones de euros. Los cuales se han relacionado en mayor medida con las inversiones requeridas para la eficiencia energética de las construcciones (EU Sustainable Finance, 2018), destacando la necesidad por profundizar y avanzar en el desarrollo de los mercados sostenibles, así como subsanar la falla del mercado por vía de los instrumentos financieros que han sido valorados por la absorción y la disminución de las emisiones de dióxido de carbono (Nicholas Stern et al., 2017). Resaltado en el año 2018 a través del acuerdo de París, donde fue identificado el sector financiero como el instrumento de avance en la transición energética a carbón-cero (UNFCCC 2018; Whitley et al. 2018; Chenet et al. 2019). Luego para el año 2020 la Oficina de Contabilidad del gobierno de los Estados Unidos reportaría que la mayoría de los inversionistas institucionales revisa la información relacionada con los estándares ambientales, sociales y gobernanza (ESG por sus siglas en inglés) al igual que para la comprensión de los riesgos que han afectado el desempeño de las compañías listadas en los mercados públicos (U.S. GAO 2020). Con ello se ha establecido el concepto de inversión sostenible, la cual incluye los factores ESG dentro de los análisis para la decisión sobre los portafolios del capital financiero según *Global Sustainable Investment Review GSIR* (JSIF 2019) (Schumacher et al., 2020).

Para junio de 2019 se estimaría el tamaño del mercado de las finanzas verdes en \$31 trillones de dólares aproximadamente, representados en títulos vigentes con un crecimiento del 34% entre el año 2016 a junio de 2019. Así como una participación superior al 30% de los activos financieros del mercado los cuales habían sido registrados bajo la administración profesional, incluyendo los estándares ambientales, sociales y gobernanza, ESG. Ver **Tabla 1** (*Global Sustainable Investment Review Finds US\$30 Trillion Invested in Sustainable Assets*, n.d.).

TABLA 1 DIMENSIONES DEL CAPITAL FINANCIERO ENFOCADO EN LA SOSTENIBILIDAD

Dimensiones del capital financiero enfocado en la sostenibilidad

Snapshot of global sustainable investing assets, 2016– 2022 (USD billions)

REGION	2016	2018	2020	2022
Europe	12,040	14,075	12,017	14,054
Canada	1,086	1,699	2,423	2,358
Australia & New Zealand	516	734	906	1,220
Japan	474	2,180	2,874	4,289
Sub-total (USD Billions)	14,115	18,688	18,220	21,921
% change		32%	-3%	20%
United States	8,723	11,995	17,081	8,400
Total (USD Billions)	22,838	30,683	35,301	30,321
% change		34%	15%	n/a

Note: 2022 not applicable due to a change in methodology



Fuente: *Global Sustainable Investment Review 2022*.

Dichos títulos verdes se encontraban contenidos en el mercado global de capitales cercano a los \$50 trillones de dólares representados en acciones y los \$100 trillones de dólares de deuda soberana o intergubernamental para 2015 (Waygood, 2015). Los cuales no han sido inmunes a los riesgos del cambio climático (UNEP, 2016), lo que generaría la expectativa sobre la transición del tratamiento de la problemática ambiental por lo que se ha requerido la financiación por el sector privado, ante un financiamiento público cada vez más escaso (UNEP 2014) y el llamado constante a los mercados por dar solución a las crisis sociales y ambientales .

2.3 Capital Social

El capital social ha sido conceptualizado como las conexiones entre las personas y organizaciones a través de las redes sociales establecidas bajo las normas y la confianza, las cuales han facilitado la respuesta colectiva a los objetivos comunes (Putnam, 1995).

De este modo el capital social podría ser esencial en el desempeño a la adaptación al cambio climático por su potencial implícito hacia la resiliencia (Saavedra et al., 2012). Al igual que su carácter complementario y de soporte dentro de las sociedades, ha permitido fomentar los elementos que favorecen su eficacia frente a los modelos de politización o polarización, los cuales han frustrado reiterativamente la transición requerida para el logro de los modelos de sostenibilidad (Keith et al., 2018) (Lo et al., 2020).

Particularmente para el desarrollo económico basado en el modelo formulado por Walt Whitman Rostow (Corbett & Rostow, 1960), donde fueron identificadas las etapas: del *statu quo*; la explotación de los recursos; la etapa intermedia de la industria manufacturera; el favorecimiento a la comercialización e industrialización de las sociedades; para la finalización con la masificación del consumo de servicios y productos, como indicador del bienestar. Por lo que sobre estos ciclos económicos su función creciente y oscilatoria, ha creado el Producto Interno Bruto de los países entendido como el capital generado por el consumo de la población sumado a los excedentes o déficits de la actividad comercial con el extranjero. Sin embargo, dichas oscilaciones han originado recesiones o estancamientos que son frecuentemente relacionados con las fallas del mercado, discrepando con la competitividad que impulsa dicha función hacia su ascenso, donde la expectativa es que esta sea superior a las crisis inducidas; aunque conforme a sus dimensiones sus efectos se han más sensibles a las poblaciones vulnerables.

Por lo que la literatura del capital social ha señalado a la marginalización de las poblaciones en los aspectos culturales, políticos y económicos (García-Velandia, 2019); entregando como resultado la mayor frecuencia en los ciclos de la pobreza y la migración a múltiples escalas. Lo que ha repercutido en los estimados anuales de muertes por polución de 4.6 millones y el desplazamiento de por lo menos 20 millones de personas por efectos del clima a nivel global (Whitmee et al., 2015). A la par serían identificados como catalizadores de estas fallas: la contaminación, la escasez de los alimentos, la disminución en las oportunidades laborales, las crisis pensionales, la corrupción, los esquemas débiles de gobernanza y las deficiencias en la protección social, entre otros (Galtung, 1990).

Mientras, el crecimiento constante de las poblaciones y el aumento en la expectativa de vida ha logrado la disminución de la mortandad infantil pasando de 214 a 59 fallecimientos por cada mil niños menores de 5 años para el periodo de 1955 a 2005. Así como la reducción de la pobreza extrema en cerca de 700 millones de personas para los últimos 30 años (Whitmee et al., 2015).

Destacados como los principales flagelos de la humanidad del siglo XX y anteriores, añadido a la introducción de los cultivos y las semillas de alto rendimiento a mediados del siglo XX, como fue el caso del trigo y el arroz en México y Filipinas (M. Borras, S. Edelman, M. y Kay, C., 2009). Elementos que podrían haber favorecido los crecimientos exponenciales de sus poblaciones de entre 5 y 6 veces para el periodo de 1950 a 2020 (Banco Mundial), estimulando el consumo de energía per cápita, donde los países desarrollados han mantenido una tasa por encima de los 10,000 KW/h, mientras los países en desarrollo consumen alrededor de los 5,000 KW/h (BP-UN).

Ahora conforme al panorama expuesto, los movimientos sociales han hecho un llamado sobre la necesidad de un modelo de mayor inclusión (Sepulveda, S. Et al 2005), plural, “pluriverso”, un mundo mestizo, descentralizado (Escobar, 2020) que permita el dialogo entre las perspectivas buscando la “paz ambiental”. En compensación a las perdidas ambientales que han mantenido un efecto perdurable (Bob & Bronkhorst, 2011)(Watson et al., 1995) superando frecuentemente los ciclos generacionales humanos en contravención del modelo de sostenibilidad. Lo que ha demandado la acción colectiva que se ha visto limitada por la capacidad reducida del ser humano por intervenir en la degradación ambiental, conforme al avance en el tiempo (Homer-Dixon, 1991). Aun con mayor efecto, para los países en desarrollo que se han encontrado expuestos a la militarización constante, alejados de la conciliación que requieren sus procesos de crecimiento económico.

Por lo que se ha hecho el llamado por establecer un marco de desarrollo que mitigue los efectos de la marginalidad, admitiendo el dialogo entre las perspectivas a favor de las transiciones requeridas; por ejemplo, para el sector rural se ha mantenido la discusión sobre su paradigma (Kay, 2001) basado en la agricultura como medio de vida (Ellis, F y Biggs, 2001). Donde ha sido identificado por la literatura de los movimientos sociales como la respuesta colectiva a las falencias por satisfacer sus necesidades básicas, requiriendo programas de política pública dirigidas a sus problemáticas y en especial a las áreas que son el punto de inicio de los ciclos de la pobreza y la marginalidad económica.

En el mismo sentido se han obtenido resultados favorables respecto a la innovación inducida por los ambientes fomentados por el capital social, donde la intensidad en el relacionamiento institucional impulsa a las actividades productivas y el conocimiento basado en el trabajo en equipo (Parlar et al., 2020). En concordancia al IPCC, quien de manera explícita reconoció al capital social como un activo que podría facilitar el paso entre la vulnerabilidad y la adaptación

climática de las iniciativas gubernamentales. Donde el capital social sirve de catalizador, a través de sus estructuras *per se*: conexiones verticales (*linking*), alianzas horizontales (*bonding*) o creando plataformas heterogéneas (*bridging*), para las organizaciones conforme a su grado de formalización (Szreter & Woolcock, 2004).

Finalizando con la agrupación por clústeres sugerida por Alarcón & Álvarez entre los Principios Cooperativos y los Objetivos de Desarrollo Sostenible, la cual ha permitido hacer la vinculación directa entre la economía solidaria y cooperativa, y el cambio climático; específicamente el clúster denominado transversalidad implícita donde las empresas pueden potencializar su institucionalismo a través del cumplimiento del ODS 13 sobre la acción por el clima, conforme al carácter intrínseco de su actividad (Alarcón- Conde & Álvarez-Rodríguez, 2020).

A manera de corolario ha sido destacada la importancia en la gobernanza respecto a la reducción de la intensidad del conflicto y como inversión en el mantenimiento de la paz (Ratner et al., 2013), similar a los resultados obtenidos en el **Capítulo 6** de la Disertación bajo los principios de diseño organizacional de Elinor Ostrom. Así como el capital social creado por la comunicación digital que ha provisto la herramienta robusta para el manejo de las crisis tal como sucedió con la pandemia del Covid-19, donde se logró mantener el relacionamiento y la conectividad social (Pitas & Ehmer, 2020) exponiendo su relevancia en la gestión de las crisis.

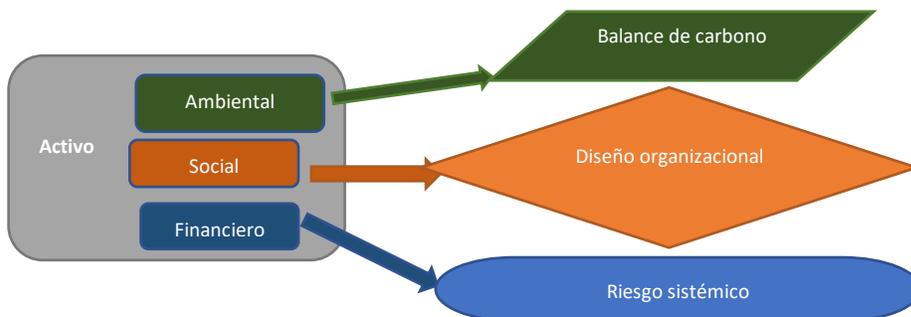
Para una revisión del estudio particular sobre el relacionamiento entre el capital social y las iniciativas ambientales, ver el **Anexo 1**. Donde se encuentra el artículo sobre *El rol potencial del Capital Social en la adaptación al cambio climático a través de las soluciones basadas en la naturaleza*, y de la misma manera en el **Capítulo 6** ha sido observada la significancia de la gobernanza del capital social en favor de las iniciativas ambientales a través de la evidencia empírica de la investigación exploratoria en campo.

2.4 Capitalización de los activos

En la **Figura 3** se ha hecho explícito el marco conceptual en función de la capitalización de los activos de los capitales ambiental, social y financiero. Donde la disertación ha presentado los resultados bajo el desarrollo de las metodologías adaptadas a cada una de las variables en términos de la profundización de los mercados de carbono y la integración de los factores en el modelo de precios para el caso de los capitales ambiental y financiero, en tanto la exploración cualitativa

soporta el estudio social de las iniciativas locales como contribuciones a cada una de las áreas del conocimiento.

FIGURA 3 MAPA CONCEPTUAL DE LOS ACTIVOS AMBIENTALES, SOCIALES Y FINANCIEROS



Fuente: desarrollo propio

Bajo el entendido de los activos de los capitales se ha formulado la caracterización de cada uno de estos elementos con referencia entre el balance de carbono y el capital ambiental, luego los diseños organizacionales como indicador cualitativo del capital social y el estimador *betha* del riesgo sistémico, aplicado al capital financiero el cual permite hacer los descuentos a la tasa de las decisiones de inversión.

De esta manera, la capitalización de los activos permite estimar las capacidades de adaptación y resiliencia al cambio climático, basado en la disponibilidad cuantificable de los bienes y los servicios (Dulal et al., 2010) en base a las unidades de medición correspondiente. Al realizar el levantamiento de la información ha sido posible establecer las interrelaciones entre los activos, para el entendimiento de las compensaciones las cuales se constituyen como el conocimiento ambiental (Karol & Gale, 2004). Espacio donde la presente disertación hace la contribución a la modelación de las tendencias de las variables ambientales en función de las compensaciones sociales y financieras del capital objeto de estudio.

2.5 Balance del carbono

Las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero CO_2e han sido distribuidas en la atmósfera, los océanos y la biosfera terrestre alterando el clima, lo que ha destacado la investigación sobre los intercambios de gases en el planeta definido como el balance del carbono. Con ello a partir de la información recabada por los múltiples institutos de investigación, se ha generado el compendio de datos sobre las mediciones, modelos y metodologías consolidados por

el *Global Carbon Budget 2023*. De esta manera ha sido posible hacer la comprensión de las dinámicas entre las emisiones a partir de la combustión de fósiles, las emisiones por los cambios en el uso del suelo, la concentración atmosférica de CO_2e , así como la capacidad de los océanos y los suelos como sumideros del carbono (Friedlingstein et al., 2023). Luego, a partir del balance del carbono se han construido las matrices de precios en función de las tasas de absorción (Bernal et al., 2018a; Griscom et al., 2017) y las capacidades almacenamiento (Saatchi et al., 2011a; Xu et al., 2021a), las cuales han permitido derivar las potencialidades económicas y las extensiones de área (Brancalion et al., 2022; Goswami et al., 2020) de las soluciones climáticas basadas en la naturaleza con el objetivo de proyectar los resultados del modelo de la disertación.

2.6 El riesgo sistémico financiero y el cambio climático

Para el desarrollo de resultados de la disertación se ha enmarcado bajo la noción del relacionamiento del cambio climático asociado al aumento del factor de riesgo sistémico financiero (Choudhury, 2020), en donde se realiza la comparación entre los costos de mitigación de los gases de efecto invernadero respecto al tamaño de los activos financieros globales.

Dado que los riesgos financieros relacionados al clima (CRFR) han sido reconocidos por los bancos centrales, lo que ha demandado la inclusión de las políticas financieras, macro-prudenciales y monetarias (Chenet et al., 2021). Así como la alineación entre las inversiones y la sostenibilidad, donde el cambio climático podría incidir en un aumento en las tasas de interés afectando los precios de los bienes y los servicios, alterando los niveles de consumo, y lo que podría desembocar en una mayor exposición a los riesgos de crédito de la economía (Monasterolo, 2020). Adicional a los efectos climatológicos, ecológicos, hídricos y otros sistemas biofísicos (Adger et al., 2018).

Finalizando con los estudios recientes sobre el impacto del cambio climático sobre el riesgo sistémico bancario (Wu et al., 2023) y el llamado a desarrollar teorías sobre: la comprensión de la relación entre el riesgo sistémico y el cambio climático; el uso de las evidencias empíricas para la evaluación de los riesgos; y, el desarrollo de las estrategias de mitigación (LI et al., 2021). Elementos aplicados a la formulación del modelo de precios de carbono.

2.7 Punto de equilibrio y costo de oportunidad

En el área del capital financiero los métodos propuestos se han basado en el balance entre los costos y los ingresos definido como el punto de equilibrio (Gaytán Cortés, 2023). El cual ha permitido dilucidar la relación de compensación entre el capital financiero y el capital ambiental;

Así bajo este precepto fue formulado el modelo de precios del carbono CO_2e en función de las variables de la tasa de absorción y la capacidad de almacenamiento de las soluciones climáticas de la naturaleza. Específicamente para el modelo se tomó como referencia el costo de oportunidad definido como el valor de una alternativa a la que se renuncia al adoptar una decisión de inversión (*Definición de Coste de Oportunidad - Diccionario Panhispánico Del Español Jurídico - RAE, n.d.*) en compensación al uso económico del suelo.

2.8 Los principios de diseño organizacional de Elinor Ostrom

Finalmente, bajo el marco metodológico de Elinor Ostrom planteado en su libro *Governing the Commons (Ostrom, 1990)*, aplicada a la validación cualitativa del diseño organizacional de las acciones colectivas que han favorecido los proyectos ambientales en Colombia. De esta manera se realizó la comprobación de la evidencia empírica entre los relacionamientos ambientales y las estrategias de sostenibilidad, destacando las implicaciones que podrían ser consideradas al desarrollar los proyectos ambientales bajo los contextos de las acciones colectivas, los territorios colectivos, la gobernanza y las comunidades de los bosques según lo explorado por las iniciativas adelantadas en Colombia.

Finalmente, en dicho espacio entre el capital ambiental y el financiero se ha propiciado la conjunción de los principios del diseño organizacional planteado por Elinor Ostrom, en términos de la longevidad y la asociatividad para la gestión de los recursos de uso común, dentro de un ecosistema en transformación. Así como ha sido observada la experiencia reciente de los mercados de capitales financieros que han redireccionado sus objetivos hacia la sostenibilidad y la transición energética. Lo anterior hace parte del **Capítulo 6 Las iniciativas ambientales solidarias en Colombia bajo el marco de los principios del diseño organizacional de Elinor Ostrom** como parte del estudio del capital social para los propósitos de la disertación doctoral.

Capítulo 3 Enfoque Metodológico

Las metodologías empleadas en la disertación parten de la revisión bibliográfica sobre las dinámicas entre los capitales ambiental, financiero y social, como marco de referencia a los mercados de carbono y las soluciones climáticas basadas en la naturaleza. Luego se realizó la aproximación desde los abordajes cuantitativos y cualitativos consonante a la relevancia del fenómeno del cambio climático respecto la incidencia sobre los mercados de carbono.

De esta manera, bajo el modelo de *dos etapas* (Hernández-Sampieri et al., 2016) se procedió a través del enfoque cuantitativo la descripción del problema de investigación conforme a la deducción de los patrones y las relaciones entre las variables climáticas del fenómeno. A través de la consulta y el levantamiento de información científica basada en el mayor número de citas, y la diversidad geográfica y numérica de las instituciones participantes de los estudios.

Para la *primera etapa cuantitativa*, dentro de la investigación experimental se originó la hipótesis planteada como: *las anomalías de la temperatura del hemisferio norte se encuentran correlacionadas a las concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera*. Donde en primera instancia para la **Sección 4.3** se identificó el factor r^2 de 0.80 y luego en el artículo *The potential of carbon pricing to abate emissions generated between 1960 and 2020 through Natural Climate Solutions Anexo 3*, el mismo r^2 aumentó a 0.88, en razón a la diferencia en la actualización de los datos entre los años 2019 y 2024 como evidencia explicativa parcial del fenómeno.

Similarmente, se abordó el enfoque cuantitativo para la deducción de la relación entre las variables de absorción de los gases de efecto invernadero y los precios de los mercados de carbono. Así de acuerdo con las fuentes bibliográficas de mayor relevancia en términos de citación y de reciente actualización, se formuló el marco de referencia que se encuentra en la **Sección 4.4 El costo financiero y el riesgo sistémico del cambio climático** por medio de la **Tabla 2 Matriz de eficiencia ambiental en función de los precios del carbono**. Resultado de la investigación descriptiva como insumo al marco teórico de la formulación del modelo de valoración de los precios de los mercados de carbono.

Para el cierre del marco teórico planteado en el **Capítulo 4 Los mercados de carbono y el cambio climático**, la investigación experimental cuantitativa permitió realizar la proyección teórica de las variables ambientales de absorción y el almacenamiento de los gases de efecto invernadero en función de los términos espacio-temporales, la creación de empleo y los precios de los mercados de carbono. Resultado de la descripción experimental del uso de las variables ambientales

identificadas para su aplicabilidad en el modelo de valoración del **Capítulo 5 Modelo de precios del carbono en función de la tasa de absorción y la capacidad de almacenamiento de las soluciones climáticas de la naturaleza.**

Luego en la **Sección 5.4 Modelo de precios del carbono CO_{2e} en función de la tasa de absorción y la capacidad de almacenamiento de las soluciones climáticas de la naturaleza**, se realizó la deducción del modelo teórico de precios bajo los criterios de la consistencia lógica de las variables ambientales, expuestas a través de la explicación de la proyección de las tendencias para los horizontes temporales de las soluciones climáticas basadas en la naturaleza en función de la madurez de los bosques, constituido como la contribución científica de la disertación doctoral al conocimiento de los mercados de carbono.

De acuerdo con la identificación de variables fue posible la búsqueda de las fuentes primarias para la recolección de datos, según las de mayor relevancia dentro del uso en las bases bibliográficas científicas; al igual que los artículos de mayor frecuencia de citación sobre la investigación de las variables identificadas, como el insumo a la revisión de la literatura consultada, constituyéndose como el marco teórico de la disertación. En particular las siguientes variables:

- ❖ *Capacidad de almacenamiento de los gases de efecto invernadero (S_{CO_2e})*
- ❖ *La tasa de absorción de los gases de efecto invernadero (ΔCO_2e)*

Donde el costo de oportunidad del uso del suelo por hectárea ha sido definido como O_K equivalente a la función del precio del carbono P_{CO_2e} como factor de la tasa de absorción ΔCO_2e adicional a la capacidad de almacenamiento S_{CO_2e} de los bosques (Ver **Sección 5.3**).

Formulando el modelo propuesto para los precios del carbono como:

$$O_K = P_{CO_2e} (S_{CO_2e} + \Delta CO_2e)$$

Así, el modelo podría tener su aplicación práctica dado que parte de las metodologías de valoración de los mercados. Logrando proveer el valor de integrar las variables ambientales en función de los costos financieros, como un factor de innovación dirigido a la discusión académica y de los practicantes del mercado. Luego las metodologías que son presentadas a continuación tienen su utilidad respecto a la comprensión de los conceptos de las variables climáticas, los costos de uso del suelo y el potencial de mitigación del cambio climático a través de los precios del carbono.

Finalmente, en el **Capítulo 6 Las iniciativas ambientales solidarias en Colombia bajo el marco de los principios del diseño organizacional de Elinor Ostrom** ha sido abordada la investigación dentro de la *segunda etapa cualitativa*. Cuyo objetivo es la validación de los

elementos planteados por la metodología de *Governing the commons* de Elinor Ostrom, conforme al alcance exploratorio aplicado a las iniciativas ambientales solidarias en Colombia dentro del diseño no experimental de la descripción de los proyectos relacionados a los precios del carbono.

Capítulo 4 Los mercados de carbono y el cambio climático

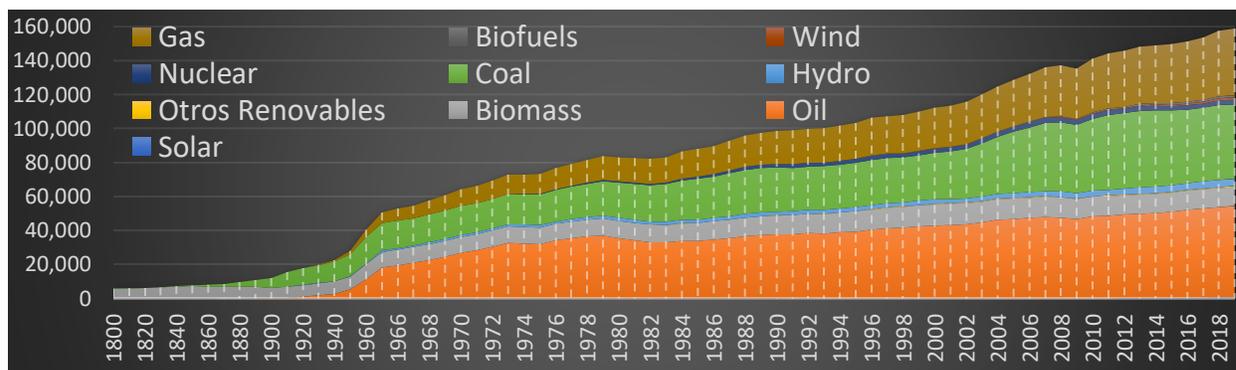
Durante los últimos 200 años se han emitido volúmenes significativos de gases de efecto invernadero, principalmente a razón de las necesidades energéticas del desarrollo de la especie humana. Con ello se ha modificado la composición de la atmósfera lo que ha generado una mayor variabilidad climatológica no aleatoria de la tropósfera alterando los flujos de los capitales social, financiero y ambiental. Como respuesta a esta anomalía la política internacional sobre el cambio climático ha formulado los mercados de carbono como instrumento de mitigación y compensación.

4.1 Necesidades energéticas globales

Históricamente, dado el crecimiento económico entre el siglo XIX y parte del XXI basado en las energías fósiles, han sido emitidos volúmenes significativos de gases de efecto invernadero a la atmosfera.

Específicamente se ha observado el aumento en el volumen de las emisiones cuya mayor participación se ha dado en la combustión del petróleo, el carbón y el gas durante los dos últimos siglos, siendo representados en la **Figura 4**.

FIGURA 4 FUENTES DE ENERGÍA POR VOLUMEN DE GENERACIÓN EN TERA VATIOS HORA TW/H



Fuente: Our World in Data (*Energy Mix - Our World in Data*, n.d.)

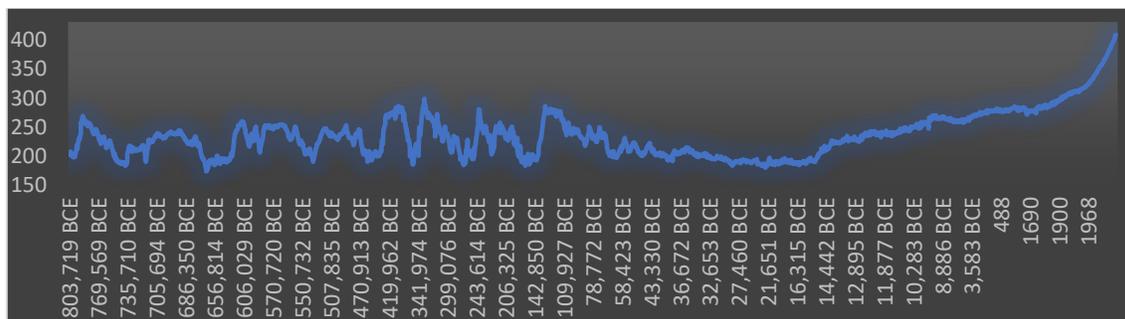
Lo anterior ha repercutido en el aumento de las emisiones anuales observadas en los años 70's a partir de los 31 gigatonnes hasta los 55 gigatonnes de CO₂e en el periodo de 2009-2018 (Minx et al., 2021). Es decir, la tendencia estadística se mantiene en aumento conforme al crecimiento económico global.

4.2 Concentración de los gases de efecto invernadero en la atmósfera

Dentro del periodo de la era cenozoica (66 millones años AC hasta la actualidad) se observó desde su inicio la acumulación de 1.400 ppm de dióxido de carbono en la troposfera durante el eoceno temprano (a partir de los 53 hasta los 51 millones de años AC). Luego se registró el descenso gradual hasta el rango de las 180 hasta las 260 ppm de dióxido de carbono en el periodo comprendido entre los años 22,000 y los 8,000 años antes de la era actual (Shakun et al., 2012). Lo anterior indicó que el calentamiento observado en el eoceno y su posterior enfriamiento fue conducido por las menores concentraciones de dióxido de carbono (Anagnostou et al., 2016). Dichas concentraciones han aumentado dentro del ciclo del carbono, donde una porción ha sido acumulada desde los inicios del siglo XIX en la atmósfera. Con esto se ha alterado el 0.04% de su composición para el año 2019 y se ha proyectado que estas concentraciones sean almacenadas por un periodo de 300 a 1,000 años (*Evidence | Facts – Climate Change: Vital Signs of the Planet*). Posteriormente, se ha generado el aumento progresivo de la temperatura por la restricción del flujo de la radiación hacia el exterior de la Tierra, lo que ha alterado la tropósfera, la capa atmosférica más cercana a la superficie de la Tierra con una altura de entre los 9 KM y los 17 KM (*Causes | Facts – Climate Change: Vital Signs of the Planet*).

Concluyendo que, durante las últimas décadas la concentración de gases de efecto invernadero presentó un aumento del 58% desde el año 2000 respecto a las registradas antes del siglo primero, ver **Figura 5**.

FIGURA 5 CONCENTRACIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂) MEDIDO EN PARTES POR MILLÓN PPM

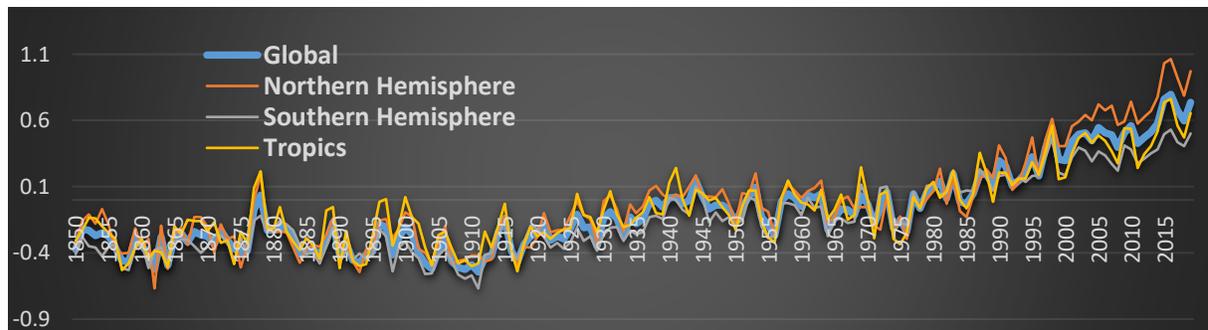


Fuente: Bereiter, B. Eggleston, S. Schmitt, J. Nehrbass-Ahles, C. Stocker, T. Fischer, H. Kipfstuhl, S. y Chappellaz, J. 2015 (*Atmospheric CO₂ Concentration*, n.d.).

4.3 Anomalías en la temperatura por las emisiones de gases de efecto invernadero

En paralelo a las concentraciones de gases de efecto invernadero, las anomalías en la temperatura de la tropósfera han correspondido a aproximadamente al aumento en la tendencia positiva de 0.8°C adicionales en la variabilidad climática de la temperatura para el periodo comprendido entre 1980 y 2020. Lo que ha representado una mayor incidencia sobre el hemisferio norte, ver **Figura 6** (Met Office Hadley Centre, 2020).

FIGURA 6 ANOMALÍAS EN LA TEMPERATURA POR REGIÓN Y GLOBAL



Fuente: Morice, C. P., J. J. Kennedy, N. A. Rayner, and P. D. Jones, 2012 (*Average Temperature Anomaly, Global*, n.d.)

Con lo previamente expuesto se observó un r^2 de 80.3% de correlación entre las concentraciones de dióxido de carbono y las anomalías de la temperatura del hemisferio norte para el periodo de 1980 a 2020, conforme a las fuentes de las **gráficas 2 y 3**. Así como la ausencia de aleatoriedad sobre el comportamiento de las variables según el resultado del análisis de tendencias de los datos⁴. En concordancia con el argumento expuesto por el IPCC en su reporte del 2021 sobre la influencia inequívoca del ser humano en el calentamiento de la atmósfera, los océanos y los suelos (Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen et al., 2021). Así como, las evidencias del aumento en la velocidad de los vientos y los niveles de los mares (Stern, 2006) proyectado entre los 52 y los 98 centímetros para el año 2100 (Whitmee et al., 2015). Planteando la exposición al riesgo para cerca del 41% de la población global que habita en las áreas costeras (Martínez et al., 2007).

⁴ Estimaciones propias.

Por último, se observó el aumento de las concentraciones de dióxido de carbono y la mayor acidificación de los océanos. Lo que ha afectado los valores de los servicios ofrecidos por los ecosistemas donde el 63% han sido provisto por los océanos, las aguas abiertas y los ecosistemas acuáticos (Martínez et al., 2007). Adicional a la pérdida por biodiversidad, donde las especies de los vertebrados han disminuido a la mitad sus poblaciones durante los últimos 45 años, así como la desaparición del 70% de los humedales en los últimos 100 años (Whitmee et al., 2015).

4.4 El costo financiero y el riesgo sistémico del cambio climático

El cambio climático es reconocido por los organismos multilaterales como la falla primaria de la economía de los mercados para el desarrollo sostenible y la distribución óptima del capital. Lo que ha generado ocasionalmente efectos negativos que podrían restringir las rentabilidades de las inversiones de capital respecto a su perdurabilidad y seguridad (CPLC, 2017).

Recientemente se ha señalado al cambio climático como parte del riesgo sistémico para los mercados financieros de los Estados Unidos, al igual que ha sido proyectado por la Universidad de Stanford el estimado en la reducción del PIB global en un 20% para el año 2100, por los efectos del cambio climático con un 51% de probabilidad (CERES, 2020). Mientras para el sistema financiero europeo se ha estimado la exposición de los activos del sector a los riesgos del cambio climático entre los ocho y los nueve trillones de euros.

Destacado por *The Stern Review on Economics of Climate Change* donde se estimó que los costos del cambio climático podrían alcanzar el 5% del PIB global anual a partir del año 2006 a perpetuidad; asimismo se enfatizó, que el costo por mitigarlo podría ser inferior, con un estimado del 1% del PIB global para su gestión (Stern, 2006). Congruente con el resultado de la matriz de eficiencia ambiental donde se observa un valor inferior a los \$1.5 trillones de dólares por año dentro de los escenarios de un mínimo de \$5 dólares por tonelada de dióxido de carbono hasta los \$100 dólares para un rango desde los 5 gigatonnes hasta los 40 gigatonnes de toneladas de dióxido de carbono y sus equivalentes por año ver **Tabla 2**.

Luego, conforme a los resultados de la matriz de eficiencia ambiental en función de los precios del carbono de la **Tabla 2**, son expuestos los rangos de mitigación de entre los 10 y los 40 gigatonnes mitigados por año, correspondientes al rango de las emisiones anuales de los últimos cien años (Friedlingstein et al., 2023) para el eje horizontal; y en función de los precios desde los \$5 hasta los \$80 dólares por tonelada de CO₂e dentro del espectro observado en los reportes de los

mercados de carbono (“State and Trends of Carbon Pricing 2019,” 2019) para el eje vertical, dando como resultado el arreglo matricial del producto de las dos variable el rango de costos de mitigación de los gases de efecto invernadero desde los \$25 billones de dólares hasta los \$3.2 trillones de dólares.

TABLA 2 MATRIZ DE EFICIENCIA AMBIENTAL EN FUNCIÓN DE LOS PRECIOS DEL CARBONO

Matriz de Eficiencia Ambiental		Niveles de gases de dióxido de carbono y otros equivalentes en Gigatonnes							
		5Gt	10Gt	15Gt	20Gt	25Gt	30Gt	35Gt	40Gt
Precios en dólares por mitigación y absorción por Tonelada de Dióxido de Carbono o sus equivalentes	\$ 5.00	\$ 25,000,000,000	\$ 50,000,000,000	\$ 75,000,000,000	\$ 100,000,000,000	\$ 125,000,000,000	\$ 150,000,000,000	\$ 175,000,000,000	\$ 200,000,000,000
	\$ 10.00	\$ 50,000,000,000	\$ 100,000,000,000	\$ 150,000,000,000	\$ 200,000,000,000	\$ 250,000,000,000	\$ 300,000,000,000	\$ 350,000,000,000	\$ 400,000,000,000
	\$ 15.00	\$ 75,000,000,000	\$ 150,000,000,000	\$ 225,000,000,000	\$ 300,000,000,000	\$ 375,000,000,000	\$ 450,000,000,000	\$ 525,000,000,000	\$ 600,000,000,000
	\$ 20.00	\$ 100,000,000,000	\$ 200,000,000,000	\$ 300,000,000,000	\$ 400,000,000,000	\$ 500,000,000,000	\$ 600,000,000,000	\$ 700,000,000,000	\$ 800,000,000,000
	\$ 25.00	\$ 125,000,000,000	\$ 250,000,000,000	\$ 375,000,000,000	\$ 500,000,000,000	\$ 625,000,000,000	\$ 750,000,000,000	\$ 875,000,000,000	\$ 1,000,000,000,000
	\$ 30.00	\$ 150,000,000,000	\$ 300,000,000,000	\$ 450,000,000,000	\$ 600,000,000,000	\$ 750,000,000,000	\$ 900,000,000,000	\$ 1,050,000,000,000	\$ 1,200,000,000,000
	\$ 35.00	\$ 175,000,000,000	\$ 350,000,000,000	\$ 525,000,000,000	\$ 700,000,000,000	\$ 875,000,000,000	\$ 1,050,000,000,000	\$ 1,225,000,000,000	\$ 1,400,000,000,000
	\$ 40.00	\$ 200,000,000,000	\$ 400,000,000,000	\$ 600,000,000,000	\$ 800,000,000,000	\$ 1,000,000,000,000	\$ 1,200,000,000,000	\$ 1,400,000,000,000	\$ 1,600,000,000,000
	\$ 45.00	\$ 225,000,000,000	\$ 450,000,000,000	\$ 675,000,000,000	\$ 900,000,000,000	\$ 1,125,000,000,000	\$ 1,350,000,000,000	\$ 1,575,000,000,000	\$ 1,800,000,000,000
	\$ 50.00	\$ 250,000,000,000	\$ 500,000,000,000	\$ 750,000,000,000	\$ 1,000,000,000,000	\$ 1,250,000,000,000	\$ 1,500,000,000,000	\$ 1,750,000,000,000	\$ 2,000,000,000,000
	\$ 55.00	\$ 275,000,000,000	\$ 550,000,000,000	\$ 825,000,000,000	\$ 1,100,000,000,000	\$ 1,375,000,000,000	\$ 1,650,000,000,000	\$ 1,925,000,000,000	\$ 2,200,000,000,000
	\$ 60.00	\$ 300,000,000,000	\$ 600,000,000,000	\$ 900,000,000,000	\$ 1,200,000,000,000	\$ 1,500,000,000,000	\$ 1,800,000,000,000	\$ 2,100,000,000,000	\$ 2,400,000,000,000
	\$ 65.00	\$ 325,000,000,000	\$ 650,000,000,000	\$ 975,000,000,000	\$ 1,300,000,000,000	\$ 1,625,000,000,000	\$ 1,950,000,000,000	\$ 2,275,000,000,000	\$ 2,600,000,000,000
	\$ 70.00	\$ 350,000,000,000	\$ 700,000,000,000	\$ 1,050,000,000,000	\$ 1,400,000,000,000	\$ 1,750,000,000,000	\$ 2,100,000,000,000	\$ 2,450,000,000,000	\$ 2,800,000,000,000
	\$ 75.00	\$ 375,000,000,000	\$ 750,000,000,000	\$ 1,125,000,000,000	\$ 1,500,000,000,000	\$ 1,875,000,000,000	\$ 2,250,000,000,000	\$ 2,625,000,000,000	\$ 3,000,000,000,000
	\$ 80.00	\$ 400,000,000,000	\$ 800,000,000,000	\$ 1,200,000,000,000	\$ 1,600,000,000,000	\$ 2,000,000,000,000	\$ 2,400,000,000,000	\$ 2,800,000,000,000	\$ 3,200,000,000,000

Fuente: elaboración propia. **Nota:** De acuerdo a UN Climate Change Conference UK 2021 (Glasgow COP 26) el objetivo propuesto es la financiación de \$100 mil millones de dólares anuales en finanzas climáticas para los países en desarrollo (*Finance - UN Climate Change Conference (COP26) at the SEC – Glasgow 2021, n.d.*)

Basado en lo anterior, el costo de mitigación a través de las soluciones climáticas basadas en la naturaleza, para un rango del 1% al 3% del PIB global anual sería el correspondiente a \$1 trillón y hasta los \$3 trillones de dólares como se puede observar en el área de los resultados desde los \$25 billones de dólares hasta los \$3.2 trillones de la **Tabla 2**.

Finalizando, a nivel macroeconómico los anteriores fenómenos climáticos extremos igualmente podrían estar repercutiendo e induciendo a la reducción de la productividad, por el mayor desempleo y el incremento en la inflación como ha sido sugerido por la publicación de la Reserva Federal de Richmond, Estados Unidos en 2021 (Kim et al., 2021). Así como un mayor costo para el sector asegurador con el aumento de la frecuencia de los eventos catastróficos. Lo que fuera destacado por la Agencia Nacional de los Océanos y la Atmósfera de los Estados Unidos, que para el año 2017 calculó las indemnizaciones relacionadas a los eventos climáticos en \$300 mil millones de dólares y han acumulado cerca de \$1.5 trillones de dólares en pérdidas para el periodo comprendido

entre los años 1980 y 2017 (*2017 U.S. Billion-Dollar Weather and Climate Disasters: A Historic Year in Context* | NOAA Climate.Gov, n.d.).

4.5 El capital social y el cambio climático

A partir de la segunda guerra mundial con el establecimiento de las Naciones Unidas se dio el paso a la actividad multilateral en favor de la reducción de la pobreza, el ambiente y el desarrollo, teniendo como resultado el mejoramiento de los indicadores de la expectativa de vida de la especie humana y la menor tasa de mortalidad de los niños menores de 5 años. Sin embargo, este avance ha tenido un alto costo en términos económicos, ambientales y sociales (Brundtland, 1987) limitando la disponibilidad de los recursos naturales para las generaciones futuras en contravención explícita al concepto de la sostenibilidad. Como fue destacado en la **Sección 1.3** sobre el Capital Social.

En particular sobre el cambio climático, el capital social podría incluir a las organizaciones públicas y privadas basándose en la confianza, la reputación y la acción recíproca, construyendo la resiliencia requerida para gestionar los riesgos. Incluyendo la interdependencia necesaria para la *capacidad adaptativa* del manejo de los recursos, dentro de las normas y las redes que hacen viable la acción colectiva sobre los riesgos a las catástrofes proveyendo marcos de seguridad y sostenibilidad (Adger, 2003). Igualmente, la flexibilidad ha sido esencial para los procesos de adaptación hacia la efectividad en el logro de los objetivos compartidos en tanto se supera la marginalización de las poblaciones vulnerables (Pelling & High, 2005).

Un ejemplo podría ser el planteado por Kevin Smiley en 2020, quien identificó en las áreas metropolitanas con menor polución, mayores niveles de conectividad social, donde los barrios con mayor riqueza económica aceptaban en menor grado el establecimiento de plantas de tratamiento de residuos peligrosos, así como la desproporción en la baja calidad del aire que ha afectado a las poblaciones de raza negra e hispana en los Estados Unidos como evidencia de la desigualdad (Smiley, 2020); soportado en la teoría de Putnam sobre el mayor nivel de relacionamiento del capital social como factor esencial para la construcción de la sociedad civil (Putnam, R. 2000).

Asimismo, como la mitigación de las barreras de adaptación al cambio climático (Wolf et al., 2010). Donde el conjunto de islas en Sicilia, Reino Unido; ha logrado demostrar la relevancia de la capacidad de las acciones colectivas y la cohesión para la adaptación al cambio climático buscando el bien común. Donde el capital social ha promovido el conocimiento local y la autonomía en la

gobernanza siendo posible formular programas de atención a los impactos por las inundaciones, tormentas y erosión creando el enlace con el personal externo que contribuye con experiencia e ideas para el desarrollo. Lo que ha permitido el entorno ideal para la cooperación, así las islas transitaron de un modelo de capital social exclusivo para las emergencias hacia la reiterativa planeación de la resiliencia en la adaptación a los fenómenos climáticos (Petzold, 2016).

4.6 Precios Globales del Carbono CO₂e

Como iniciativa hacia la mitigación de los gases de efecto invernadero, se han formulado los títulos valores basados en la certificación de la mitigación y la compensación de las emisiones en toneladas de dióxido de carbono o sus equivalencias provenientes de otros gases (CO₂e). Los cuales han sido referenciados a los precios del mercado de carbono o los impuestos a las emisiones., así el adquirente certifica la cobertura de sus emisiones, siendo una herramienta que facilita la regulación respecto a otros tipos de política (Harvey et al., 2018).

Entre las propuestas de la agenda global de sostenibilidad se han formulado los mercados de carbono, cuyo objetivo es la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de manera costo efectiva, estableciendo límites y habilitando las transacciones de las unidades de emisiones, basado en los mecanismos de mercado e impuestos al carbono (*Carbon Markets United Nations Development Programme, 2016*). De esta manera, en la comunidad financiera internacional se ha dado el consenso sobre los mercados del carbono como la herramienta de mayor alcance y potencial para el manejo del cambio climático a través de la adecuada formulación de sus precios (Orsagh et al., 2020) a pesar de su dispersión y complejidad.

Luego específicamente, para el objetivo principal de los precios de carbono por reducir las emisiones, se han identificado los objetivos secundarios como la equidad, la reducción de pululantes, lo que ha estimulado el desarrollo tecnológico y económico, así como el potencial por reducir los impuestos al carbono. Por ello, en 1997 con el protocolo de Kyoto fue formulada la iniciativa multilateral de la acción climática para la reducción de las emisiones por deforestación y degradación (REDD+), con el objetivo de mantener y extender los bosques como sumideros para el almacenamiento del dióxido de carbono, principalmente en las regiones del trópico(*Putting Carbon Markets to Work on the Path to Net Zero, McKinsey,*).

Luego según *the High-Level Commission on Carbon Prices* del Banco Mundial y el Ministerio de la Transición Ecológica y Solidaria de Francia, plantearía los precios objetivo por tonelada para el

año 2020 en un rango de entre los \$40 y los \$80 dólares, para así en el año 2030 estar entre los \$50 y los \$100 dólares (CPLC, 2017). Partiendo de la fijación de precios por medio de los mercados voluntarios y los mandatorios que para el año 2020, los cuales se contabilizaban en 31, adicionales a los impuestos fijados por 30 países a las emisiones de gases de efecto invernadero.

Sin embargo, los precios al ser revisados a una escala global se ha observado que han fluctuado en alrededor de los \$2 y \$3.7 dólares por tonelada de dióxido de carbono mitigada según el Fondo Monetario Internacional (Parry, 2019) y el Banco Mundial. Logrando una cobertura del 22% de las emisiones de gases de efecto invernadero, con la financiación de \$45 mil millones de dólares destinados a la reconversión industrial, las energías renovables, la captura de las emisiones y las actividades forestales, entre otros (World Bank, 2020).

Sobre los precios del carbono en el mercado europeo; por un periodo 10 años se encontraron alrededor de los \$10 euros por tonelada (2008-2017), sin embargo, a partir de enero de 2018 se incrementaron desde los \$8 euros hasta los \$30 euros en julio de 2019. Luego fluctuarían por dos años entre los \$20 y los \$30 euros, y para finales de 2021 alcanzarían los \$63 euros. En febrero de 2022, alcanzaron el récord de \$96 euros y con la crisis en Ucrania disminuirían a los \$70 euros (CERES, 2022). Ante el panorama expuesto de amplitud y diversidad de precios, la discusión se ha centrados en la búsqueda de la estandarización y la posibilidad por consolidar los mercados disminuyendo las asimetrías de información para los agentes de los mercados.

A continuación, es presentada la **Figura 7** la cual resume los precios, países/regiones y financiación obtenida a través de las iniciativas de mercado e impuestos para la mitigación de gases de efecto invernadero, donde se puede apreciar su fragmentación y aún en etapa de incubación.

FIGURA 7 PRECIOS DEL CARBONO, COBERTURA EN LAS EMISIONES E INGRESOS GENERADOS

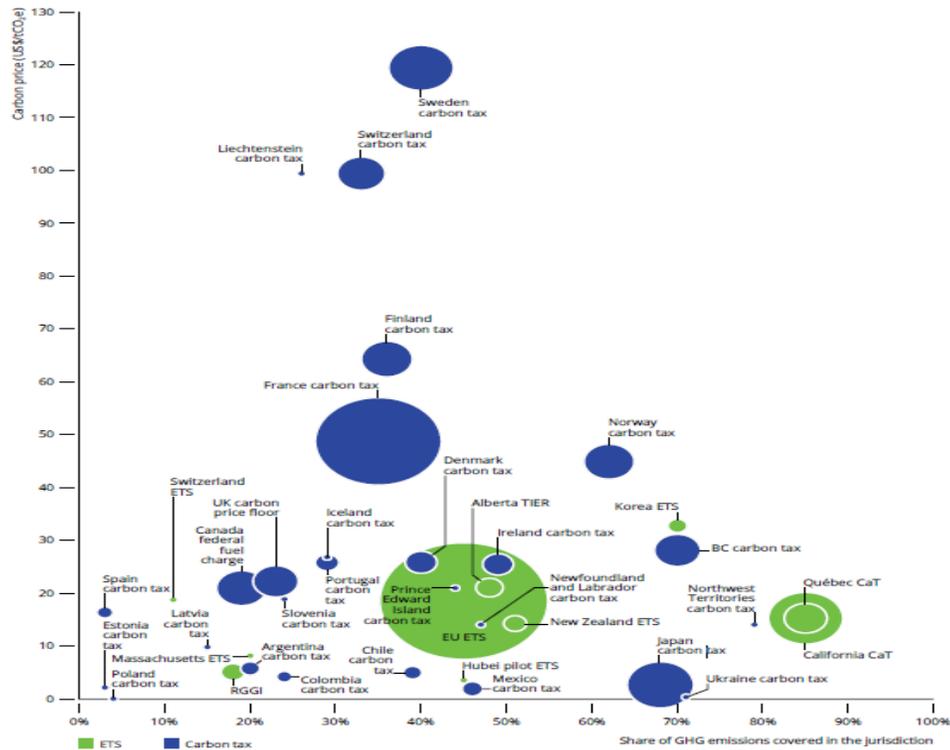
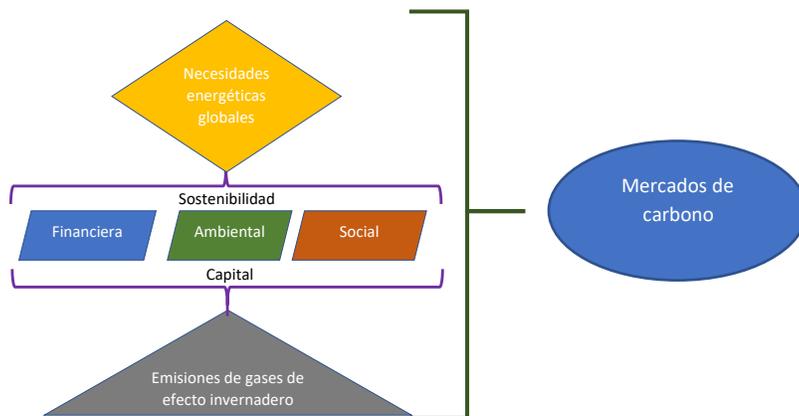


Imagen tomada de *State and Trends of Carbon Pricing 2020* (World Bank, 2020).

Es importante anotar que se ha identificado el inconformismo sobre las lógicas de mercado al ser aplicadas a la conservación por la inhabilidad de la economía verde por copar las múltiples crisis del capitalismo (McAfee, 2016). Aunque desde el punto de vista práctico en un planeta con múltiples límites los mercados podrían aminorar las presiones planetarias (Engström et al., 2020) así como no se ha logrado observar hacia el corto y mediano plazo desligar las emisiones del crecimiento económico en términos del Producto Interno Bruto (Hickel & Kallis, 2020). Por lo que se ha dado una mayor priorización a las *soluciones climáticas basadas en la naturaleza*, específicamente las relacionadas con la administración forestal por su significancia respecto a la gestión global del cambio climático bajo un precio eficiente por debajo de los \$100 dólares (Griscom et al., 2017).

Propuesto así el modelo de tendencias de precios eficientes con relación a la mitigación y la acumulación de las emisiones de las toneladas de dióxido de carbono y sus equivalentes; considerando los elementos previamente expuestos en función de la sostenibilidad de los capitales ambiental, social y financiero (Ver Figura 8).

FIGURA 8 MARCO TEÓRICO DE LOS MERCADOS DE CARBONO BASADOS EN LA SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA DE LOS CAPITALES AMBIENTAL, FINANCIERO Y SOCIAL



Donde se ha planteado el problema de la disertación, bajo la estimación del potencial de la administración forestal como una *solución climática basada en la naturaleza*, bajo el modelo integrador de los procesos de absorción y almacenamiento de las emisiones de los gases de efecto invernadero a través de los precios de los mercados del carbono. Adicional a su función de salvaguarda a los Objetivos de Desarrollo Sostenible, respecto a la gestión por la compensación a las emisiones y maximizar las sinergias entre los objetivos a escala global y local (Griggs et al., 2013).

4.7 Proyecciones

Los resultados de la investigación sobre la presente disertación **Sección 4.7 Proyecciones** corresponden a los expuestos en los artículos *¿How much and for how long could the annual cost of atmospheric greenhouse gas (CO₂e) abatement between 1960-2020 through carbon pricing be estimated?* y *The potential of carbon pricing to abate emissions generated between 1960 and 2020 through Natural Climate Solutions* los cuales aparecen en el **Anexo 2 y Anexo 3** sometidos a revisión y publicación académica.

A continuación, se han expuesto los marcos espacio-temporales en función de los costos estimados de la mitigación del cambio climático a través de los precios del carbono, basándose en las emisiones antropogénicas de los gases de efecto invernadero para el periodo comprendido entre los años 1960 y 2020.

Para ello, se construyó la matriz de precios utilizando las bases de datos públicas sobre las emisiones globales reportadas (Andrew, 2021; Friedlingstein et al., 2020). Luego, se formularon los escenarios de almacenamiento de los gases de efecto invernadero formados a partir de los precios eficientes por debajo de los \$100 dólares (Griscom et al., 2017), donde la eficiencia es percibida como el menor costo de comprar los certificados en función de las toneladas de dióxido de carbono y sus equivalentes para los gases de efecto invernadero. Esto permitió determinar la gama de precios factibles, los cuales al evaluarse en la escala de la capacidad de absorción lograron mantenerse en los rangos de inversión esperados, según las estimaciones de la Presidencia de la COP sobre la capacidad de la inversión anual y el Informe Stern sobre la Economía del Cambio Climático (Stern, 2006) como fue observado anteriormente en la **Sección 4.4** y la **Tabla 2**, es decir por debajo del 2-4% del PIB global y los \$100 billones de dólares.

En consecuencia, como contribución al conocimiento de los precios del mercado del carbono, se formularon los escenarios de los costos anuales totales para la gestión del cambio climático sobre la base de las emisiones históricas de 1960 a 2020 y del modelo financiero que compensaría las inversiones. Incluyendo la absorción y el almacenamiento de los gases de efecto invernadero de CO_2e en términos de tiempo para un rango de 13 a 63 años **Tabla 3** y un costo anual de 50.000 millones hasta los 1,2 trillones de dólares. Como ha sido expuesto en la **Tabla 2** donde para el escenario más próximo se lograría la mitigación de los 319 gigatonnes para el año 2038 bajo la absorción de 23 Gt de CO_2e anuales.

TABLA 3 AÑOS REQUERIDOS PARA EL ABATIMIENTO DE 319 GIGATONES DE CO_2e A TRAVÉS DE LAS SOLUCIONES CLIMÁTICAS DE LA NATURALEZA

Tasa anual de absorción de gigatonnes de CO_2e	Año alcanzado para el almacenamiento de 319 gigatonnes de CO_2e_{stock}	Número de años a partir del año 2025
3 Gt	No disponible	NA
5 Gt	2088	63
7 Gt	2070	45
11 Gt	2053	28
13 Gt	2049	24
17 Gt	2043	18
19 Gt	2041	16
23 Gt	2038	13

Fuente: estimaciones propias.

Luego, se ha argumentado que los mercados del carbono podrían mitigar el cambio climático en función de las limitaciones expuestas mediante las soluciones climáticas de la naturaleza, en un lapso próximo en tanto se puedan dar los procesos de la transición energética de la agenda global.

De otro lado, sobre el potencial de los precios del carbono en términos del desarrollo rural a través de soluciones climáticas de la naturaleza dada su capacidad por mitigar las emisiones antropogénicas generadas en el periodo comprendido entre 1960-2020. Se ha estimado la extensión forestal necesaria, en función de la tasa de absorción y la capacidad de almacenamiento, enfatizando la creación de empleo en las zonas rurales.

De acuerdo con los estudios realizados por *Ecosystem restoration job creation potential in Brazil* (Brancaion et al., 2022) fue estimada la creación de aproximadamente 0,42 empleos directos e indirectos por hectárea en los procesos de restauración y reforestación, donde para el caso de Brasil se crearían entre 1.76 y 4.4 millones de empleos a través de la restauración de 12 millones de hectáreas conforme a los tiempos de ejecución de los proyectos. De manera similar, los resultados del estudio *Restoring Employment and Rural Landscapes Can Ecological Restoration Usher Rural Economic Revival in the 'Post-pandemic' Period* (Goswami et al., 2020) se proyectaba cerca de 5 millones de empleos con la restauración de por lo menos 26 millones de hectáreas en la India. Por lo anterior, bajo la simulación de los escenarios sobre el desempeño de los precios del carbono, se ha dado como resultado, el potencial de generación de 140 a 400 millones de nuevos empleos en las zonas rurales, con la absorción de CO₂e en un rango de 9 Gt a 13 Gt por año y el almacenamiento de 320 Gt en un escenario de simulación para el periodo de 2025 a 2060. A través de la restauración de alrededor de 700 a 1.000 millones de hectáreas como se puede observar en la **Tabla 4** y la **Tabla 5**.

TABLA 4 CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE CO₂E EN FUNCIÓN DE LAS EXTENSIONES DE BOSQUES RESTAURADOS

Absorción anual de CO ₂ e en gigatonnes	Tasa anual de absorción en toneladas de CO ₂ e por hectárea		
	9 tons/año	11 tons/año	13 tons/año
Extensión de hectáreas reforestadas			
700,000,000 Ha	6 Gt	8 Gt	9 Gt
800,000,000 Ha	7 Gt	9 Gt	10 Gt
900,000,000 Ha	8 Gt	10 Gt	12 Gt
1,000,000,000 Ha	9 Gt	11 Gt	13 Gt

Fuente: estimaciones propias por debajo de las tasas de absorción planteadas para la restauración de bosques (Bernal et al., 2018a).

TABLA 5 POTENCIAL DE CREACIÓN DE EMPLEO DE LA SOLUCIONES CLIMÁTICAS DE LA NATURALEZA

Potencial de empleabilidad (Millones)	Factor de empleo por hectárea reforestada		
	0,2	0,3	0,4
Hectáreas reforestadas (millones)			
700 Ha	140 M	210 M	280 M
800 Ha	160 M	240 M	320 M
900 Ha	180 M	270 M	360 M
1.000 Ha	200 M	300 M	400 M

Fuente: estimaciones propias conforme a los resultados de (Brancaion et al., 2022) y (Goswami et al., 2020).

Lo anterior se interpreta como la contribución a la empleabilidad y la extensión forestal en hectáreas del potencial económico de los mercados de carbono conforme a los estudios citados y las variables descriptivas de las soluciones climáticas de la naturaleza.

Sobre la base de los resultados obtenidos, se ha proyectado la gama general de escenarios de tarificación del carbono de \$10 a \$ 30 dólares, destinados a gestionar las emisiones generadas entre los años 1960 y 2020, proporcionando alternativas eficientes para contrarrestar la migración del campo a la ciudad a un costo anual total desde los \$70.000 hasta los \$400.000 millones de dólares como se puede observar en la **Tabla 6**.

TABLA 6 COSTO ANUAL DE LAS SOLUCIONES CLIMÁTICAS DE LA NATURALEZA EN FUNCIÓN DE LA MITIGACIÓN DE CO2E POR AÑO

Costo anual de las soluciones climáticas de la naturaleza en billones de dólares	Gigatonnes de CO2e abatidos por año	
	9 Gt/año	13 Gt/año
Precio por tonelada de CO2e abatida		
\$ 10	\$90	\$130
\$20	\$180	\$260
\$30	\$270	\$390

Fuente: estimaciones propias conservadoras por debajo de los resultados proyectados por (Griscom et al., 2017).

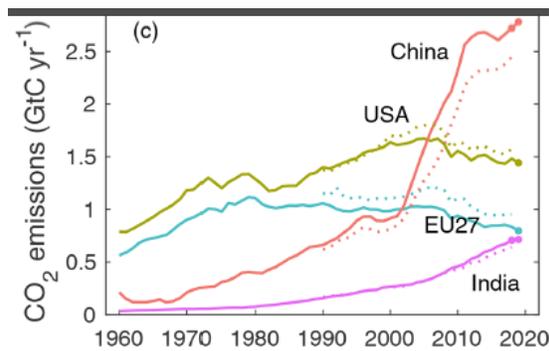
Capítulo 5 Modelo de eficiencia ambiental basado en los precios del carbono como función de la tasa de absorción y la capacidad de almacenamiento de las soluciones climáticas de la naturaleza

Para el Capítulo 5 se ha realizado el planteamiento teórico del modelo de precios del carbono a partir del balance de carbono, donde la participación de los bosques y los océanos ha logrado mantener una mayor participación en la tasa de absorción y la capacidad de almacenamiento de CO_2e respecto a la atmosfera. Igualmente, han sido generados los escenarios financieros y ambientales bajo la aplicación del modelo teórico conforme a las expectativas de las agendas globales de gestión del cambio climático y los documentos de mayor relevancia académica y citación científica respecto a las proyecciones.

5.1 Balance global del carbono

Los estimados de las emisiones de dióxido de carbono dentro del balance de carbono son lideradas por China, Estados Unidos, Europa e India como se puede observar en la **Figura 9** donde se ha resaltado la incertidumbre bajo márgenes de error de $\pm 10\%$ o $\pm 2\sigma$, así como las emisiones por el consumo interno en líneas punteadas al ser comparadas a las observadas a nivel territorial (Friedlingstein et al., 2020).

FIGURA 9 PRINCIPALES EMISORES DE DIÓXIDO DE CARBONO



Fuente: *Global Carbon Budget 2020* (Friedlingstein et al., 2020)

Igualmente, se ha presentado el balance global de carbono observado en las últimas décadas en unidades de Gigatonnes (Gt) de dióxido de carbono, donde se ha identificado la significancia en la participación de los océanos y los suelos como sumideros de carbono. Al igual que se ha incluido el desbalance por la incertidumbre en los modelos de estimación, como puede observarse en la **Tabla 7**. De este modo fue posible observar la dinámica del ciclo del carbono, donde la absorción de los suelos y los océanos en conjunto ha sido mayoritaria, aunque con tendencia a limitarse respecto a la atmosfera, la cual se aproxima a convertirse en el principal receptor de las emisiones.

TABLA 7 PRESUPUESTO DEL BALANCE GLOBAL DE DIÓXIDO DE CARBONO CO₂e 1959-2019

Años observados	1960-69	1970-79	1980-89	1990-99	2000-09	2010-19
Emisiones de origen fósil	11Gt	17Gt	20Gt	23Gt	28Gt	34Gt
Emisiones por el uso del suelo	5Gt	5Gt	5Gt	5Gt	5Gt	6Gt
Emisiones Totales	16Gt	22Gt	25Gt	28Gt	33Gt	40Gt

Absorción por la atmosfera	7Gt	10Gt	12Gt	12Gt	15Gt	19Gt
Absorción de los océanos	4Gt	5Gt	6Gt	7Gt	8Gt	9Gt
Absorción de los suelos	5Gt	8Gt	7Gt	10Gt	11Gt	12Gt
Absorción Total	15Gt	23Gt	26Gt	29Gt	33Gt	40Gt

Desbalance por incertidumbre	1Gt	-1Gt	-1Gt	0Gt	0Gt	0Gt
-------------------------------------	------------	-------------	-------------	------------	------------	------------

Tomado de *Global Carbon Budget 2020* (Friedlingstein et al., 2020) convirtiendo las unidades de carbón a dióxido de carbono equivalente CO₂e.

A continuación, son presentadas las perspectivas sobre la gestión del cambio climático según las soluciones tecnológicas (mecánicas) y las soluciones climáticas de la naturaleza, a partir de los factores de costo y el potencial de absorción y mitigación.

5.2 Soluciones tecnológicas para la mitigación y compensación de las emisiones de efecto invernadero

Desde 1950 se han dado desarrollos tecnológicos que buscan la absorción directa del dióxido de carbono de la atmosfera. Sin embargo, los mayores obstáculos observados han sido los relacionados al costo de la implementación y su alcance respecto a las dimensiones del fenómeno. Bajo el entendimiento del rango del costo estimado entre los \$100 y los \$1,000 dólares por tonelada

absorbida de dióxido de carbono y sus equivalencias, lo que ha generado la incertidumbre sobre su implementación al estar por fuera de lo que ha sido considerado el costo efectivo por debajo de los \$100 dólares (Griscom et al., 2017). Igualmente, según lo publicado por la Sociedad Americana de Física, ha determinado un costo de \$780 dólares para la mitigación y \$550 dólares para la absorción del dióxido de carbono por tonelada (Socolow et al., 2011). Adicional, al estudio de la Universidad de Harvard publicado por *Joule*⁵ donde se estimó los costos de entre los \$107 y los \$249 dólares por tonelada, con la limitante por no lograr incluir la totalidad de los costos asociados al análisis del ciclo de vida de las soluciones (LCA -*life cycle assessment* por sus siglas en inglés) (Keith et al., 2018a).

En concreto, la limitante reiterativa a las soluciones tecnológicas (mecánicas) de la literatura científica ha sido el alcance de dichas soluciones, dado que en el año 2014 se estimó que solo lograban la captura y el almacenamiento acumulado de 15 millones de toneladas por año (0.015 Gt). Asimismo, se predecía que dichas tecnologías no lograrían ser fiables para una acción global (De Coninck & Benson, 2014) en parte por el alto costo de la energía en el que deberían incurrir (Wilberforce et al., 2019). Como ejemplo en septiembre de 2021 se inició la operación de la planta de captura y almacenamiento de dióxido de carbono más grande del mundo con capacidad de absorción de 4,000 toneladas anuales y para el 2026 se esperaba que se diera el inicio la operación de la planta de absorción directa de un millón de toneladas al año en Escocia (*Carbon Capture | MIT Climate Portal*, n.d.)(*What It Will Take to Achieve Affordable Carbon Removal | MIT Climate Portal*, n.d.)(*FAQs about Our Carbon Removal Technology - Carbon Engineering*, n.d.)(*In Pictures: World's Largest Carbon Capture Plant in Action - BBC Science Focus Magazine*, n.d.) siendo la evidencia anecdótica sobre su etapa temprana de desarrollo.

5.3 Potencial de las soluciones climáticas de la naturaleza ($S_{CO_2e} + \Delta CO_2e$)

Conforme a lo expuesto, es desarrollado a continuación el panorama general de los escenarios de las soluciones climáticas de la naturaleza para los años 2081 a 2100, donde había sido evidenciada su relevancia por el IPCC (Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen et al., 2021), compilados dentro de la **Tabla 8**.

⁵ Revista dedicada al campo de la energía calificada por Scimago Journal & Country Rank dentro del primer cuartil desde su fundación en 2017. SCImago,. SJR — SCImago Journal & Country Rank. Recuperado en Julio 14 de 2024, <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21100834904&tip=sid&clean=0>

TABLA 8 ESCENARIOS GLOBALES IPCC 2081-2100 SOBRE LAS PROPORCIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO ABSORBIDAS POR LA ATMOSFERA, LOS SUELOS Y LOS OCÉANOS

Escenarios IPCC	Atmosfera	Suelos y Océanos	Temperatura 2081-2100	Giga-toneladas de dióxido de carbono emitidos por año para el año 2100
SSP1-1.9	30%	70%	1°C a 1.8°C	Emisiones negativas
SSP1-2.6	35%	65%	1.3°C a 2.4°C	Emisiones negativas
SSP2-4.5	46%	54%	2.1°C a 3.5°C	10 Gt – 20 Gt
SSP3-7.0	56%	44%	2.8°C a 4.6°C	80 Gt
SSP5-8.5	62%	38%	3.3°C a 5.7°C	120Gt -140Gt

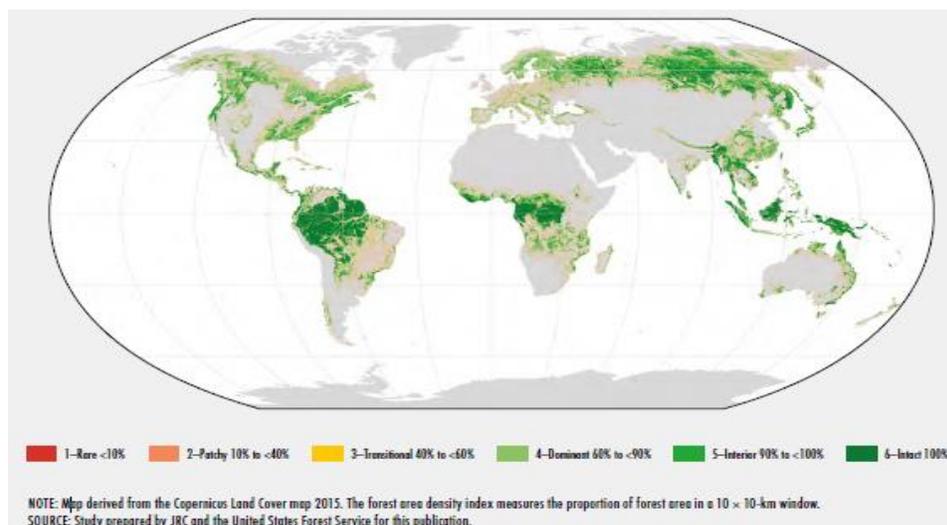
Fuente: (Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen et al., 2021)

De esta manera en la **Tabla 8** se describe la participación de la atmosfera, los suelos y océanos en la absorción de los gases de efecto invernadero, donde existe la relación inversa de participación de los suelos y océanos respecto al aumento en la temperatura, es decir su relevancia como variable de gestión del cambio climático. Donde los valores de referencia de la última columna han vinculado el volumen de emisiones globales anuales para el año 2100 dentro del balance del carbono y como se verían afectadas las demás variables de temperatura y lugar de absorción según los escenarios propuestos por el IPCC. Lugar donde se evidencia la necesidad por mantener a los suelos y los océanos como los principales receptores de las emisiones de gases de efecto invernadero para mantenerse en un rango de incremento de temperatura por debajo de los 3.5°C.

En base a lo expuesto, los bosques podrían ser considerados como uno de los mayores sumideros de dióxido de carbono con una extensión aproximada de 3,900 millones de hectáreas sobre los suelos de la Tierra; distribuidas en cerca 2,000 millones de hectáreas incluidas en los planes de administración forestal de largo plazo y 400 millones de hectáreas designadas para la conservación de la biodiversidad (FAO,2020). Siendo la solución de mayor alcance y flexibilidad a partir del potencial de gestionarse a través de las políticas del desarrollo y la evidencia científica expuesta.

A manera de ilustración se puede observar los bosques intactos a nivel global, así como su relativa conectividad en la **Figura 10**.

FIGURA 10 ÍNDICE DE DENSIDAD DEL ÁREA FORESTAL EN EL AÑO 2015



Fuente: FAO 2020

Adicionalmente, los bosques han sido clasificados entre los biomas boreales con 1,135 millones de hectáreas y los tropicales con 1,949 millones de hectáreas (Pan et al., 2011), dentro de una extensión global de suelos de aproximadamente de 14,900 millones de hectáreas (*Land Use - Our World in Data*, n.d.). Siendo constituidos por cerca de 60,000 especies de árboles de las cuales 20,000 se han situado en la lista roja de especies amenazadas, y Europa se encontró con cerca del 58% de las especies endémicas en proceso de extinción (FAO, 2020).

De igual forma, conforme al aumento de las sequías y los inviernos más cálidos se ha observado la reducción en las tasas de absorción, lo que ha incrementado las quemadas y el daño a los bosques (Pan et al., 2011). Donde aproximadamente el 20% de la superficie de la Tierra ha sido degradada entre los años 2000 y 2015 (UN, 2019a).

Además, para el periodo comprendido entre el año 2007 y el año 2016 se estimó que una quinta parte del dióxido de carbono presente en la atmósfera fue absorbida por las plantas transformándolo en azúcares y almidones, a través del proceso de fotosíntesis (Keenan & Williams, 2018)(Griscom et al., 2017). Para el proceso global de fotosíntesis fue observada la mejora por una menor tasa anual de deforestación de 10 millones de hectáreas entre el año 2015 y 2020, la cual ha sido inferior a la de los años 90s estimada en alrededor de 16 millones por año (FAO, 2021).

Específicamente en el artículo *Natural Climate Solutions* publicado en *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, se observó el potencial de mitigación de aproximadamente

23.8 Gigatonnes anuales de dióxido de carbono adicionales por medio de: la reforestación de 678 millones de hectáreas, la limitación a la deforestación y la administración forestal de 1.914 millones de hectáreas contribuyendo con la mitigación y compensación de 10 Gt, 3.6 Gt y 1.5 Gt de CO_2e respectivamente; para un rango de costo de entre los \$10 y los \$100 dólares (Griscom et al., 2017) por tonelada de CO_2e . Lo que ha sido congruente con las estimaciones potenciales de la restauración de 1.800 millones de hectáreas de suelos degradados con vegetación dispersa (FAO, 2020).

Asimismo, como ejemplo se dio la iniciativa *trilliontrees* que ha buscado la restauración de 400 millones de hectáreas y el almacenamiento de 104 gigatonnes, favoreciendo a 66 millones de personas, con el objetivo de superar lo realizado desde los años 90 cuando fueron recuperadas 300 millones de hectáreas de bosques y la reducción de 9 gigatonnes de dióxido de carbono con los programas de REDD+ (FAO, 2020). <https://trilliontrees.org/>

Sobre la reforestación, su costo se ha estimado entre los \$10 y los \$100 dólares de 2015 por hectárea para el caso de los Estados Unidos, con un potencial de 62.9 millones de hectáreas y la administración forestal de 123 millones de hectáreas, con la posibilidad de abatir cerca de 0.5 Gt de dióxido de carbono al año a través de ambas soluciones (Fargione et al., 2018), sobre una extensión de suelos aproximada de 915 millones de hectáreas para este país (*Land Use - Our World in Data*). Mientras en China, se ha estimado que diez de sus proyectos de protección y restauración ecológica lanzados a mediados del siglo pasado han sido considerados en conjunto los de mayor alcance a nivel global, contribuyendo con el almacenamiento de cerca de 0.4 Gt de dióxido de carbono y se ha proyectado la restauración de 90 millones de hectáreas de pastizales en el corto plazo (Qin et al., 2021), sobre su extensión de suelos de 940 millones de hectáreas (*Land Use - Our World in Data*). Lo anterior dentro de las expectativas de costo para las políticas locales y dentro de los presupuestos gubernamentales.

Particularmente, para los bosques tropicales se ha evidenciado la disminución del área superficial lo que le ha restado capacidad como sumidero de carbón, por lo tanto fue proyectado para el año 2030 que el Amazonas podría presentar un mayor nivel de emisiones respecto a su tasa de absorción y capacidad de almacenamiento de gases de efecto invernadero (Hubau et al., 2020).

Capacidad de almacenamiento de gases de efecto invernadero (S_{CO_2e})

Para las regiones tropicales de Latinoamérica, África Subsahariana y el sudeste asiático se estimó que dentro de sus extensiones de bosque de 2,500 millones de hectáreas se almacenaban cerca 247 Gt de carbón es decir en CO₂ equivalente a 900 Gigatonnes aproximadamente o un promedio por hectárea de 355 toneladas de CO₂e (Saatchi et al., 2011a). Estimado que es congruente con el almacenamiento de carbón en la biomasa del planeta 381±2 PgC o aproximadamente 1,400 Gigatonnes de CO₂e (Xu et al., 2021a).

Tasa de absorción de gases de efecto invernadero (ΔCO_2e)

Se ha estimado que las emisiones acumuladas entre 1990 y 2019 han sido cerca 872 GtCO₂, en tanto durante el periodo comprendido entre 1750 y 1990 se emitieron cerca de 804 Gt CO₂ (Stoddard et al., 2021a)

En compensación las hectáreas de bosque tropical podrían absorber entre 10 y 30 toneladas de dióxido de carbono anualmente a través de la reforestación (“FAO State of the World’s Forests,” 2004). Específicamente para la regeneración natural de los bosques de Suramérica se ha estimado una tasa de remoción de dióxido de carbono por año de 18.8 toneladas para el bosque húmedo y 13.8 para el bosque seco (Bernal et al., 2018a).

Conforme a dichas dimensiones de las emisiones acumuladas, sería necesario restaurar entre 400 millones y 1,000 millones de hectáreas para lograr compensar las emisiones del periodo comprendido entre 1990 y 2020, dependiendo de la capacidad de absorción de los bosques como fue observado en las proyecciones de la **Sección 4.7**.

Concluyendo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, donde en el numeral 15 busca gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras y deteniendo la pérdida de la biodiversidad (Naciones Unidas). Así como la Declaración de los Migrantes y Refugiados de Nueva York en 2016, que en su objetivo primero busca disminuir a la mitad la tasa global de pérdida de bosques para el año 2020 y para el año 2030 llevarla a cero (FAO & UNEP, 2020).

5.4 Modelo de eficiencia ambiental basado en los precios del carbono CO_2e en función de la tasa de absorción y la capacidad de almacenamiento de las soluciones climáticas de la naturaleza.

Los precios de los mercados de carbono en principio fueron planteados hacia desincentivo a las emisiones globales de gases de efecto invernadero, sin embargo, dicho efecto no ha sido logrado (Rafatya et al., 2020). Por lo que su direccionamiento se ha enfocado en la financiación de la compensación y la adaptación al cambio climático por lo que en los años recientes se ha observado una mayor movilización de recursos hacia los proyectos forestales (World Bank, 2023). En línea con la necesidad por profundizar las interacciones entre los bosques, el cambio climático, y los flujos del carbón (Sohngen et al., 2010).

Como resultado los mercados de carbono han presentado nuevas perspectivas sobre sus ventajas respecto a otras políticas climáticas, como: internalizar el costo de las emisiones para las empresas y los consumidores; los acuerdos entre los emisores y las compensaciones sobre la noción del costo de los gases de efecto invernadero en las economías; la restricción a la expansión de las energías de origen fósil; y, la descentralización regulatoria en favor de la disminución de las asimetrías de información. (Baranzini et al., 2017). Sumado a la posibilidad de generar el doble dividendo ambiental cuando los ingresos generados por los certificados de carbono son reinvertidos en las actividades de mitigación de emisiones (Narassimhan et al., 2018).

Equivalentemente, se han controvertido los mitos más populares sobre los mercados de carbono como son: el detrimento del crecimiento económico; la pérdida de puestos de trabajo; el impacto similar entre los mercados y los mecanismos *cap-and-trade*; y, la regresividad (Metcalf, 2023). Por lo que ha sido posible adicionar su capacidad por aminorar otras presiones planetarias como: la acidificación de los océanos, la protección de la biodiversidad, los sistemas del uso del suelo, la potabilización del agua, entre otros (Engström et al., 2020).

Finalmente es anotado, que los precios del carbono no solo podrían contribuir a la transición a una economía basada en menores emisiones, sino que adicionalmente podría compensar el costo de manera más efectiva, al poder brindar la flexibilidad en la toma de decisiones sobre la energía a las empresas y los ciudadanos (Tietenberg, 2012).

Paradoja del mercado

A los inicios del año 2021 en Estados Unidos fue adoptado el precio de la tonelada de CO₂e en \$51 dólares sin embargo por cambios en la administración fue reestablecido a \$1 dólar, para luego ser aproximado a \$125 dólares por un grupo intergubernamental. De otro lado en el Reino Unido fue establecido el rango GBP 122 y GBP 367 por tCO₂e en 2021 (JP Morgan). Lo que ha suscitado controversias permanentes que han dificultado la estandarización o marcos de referencia a los precios. Por lo que la presente Disertación Doctoral hace la propuesta a la discusión del siguiente modelo de Precio Base de los Mercados de Carbono.

Precio base de los mercados de carbono P_{CO_2e}

Conforme a revisión bibliográfica y los elementos del presente Capítulo, se ha hecho la propuesta del modelo de *precio base para los mercados de carbono* basado en las soluciones climáticas de la naturaleza, donde el costo de oportunidad del uso del suelo por hectárea O_K es equivalente a la función del precio del carbono P_{CO_2e} como factor de la tasa de absorción ΔCO_2e adicional a la capacidad de almacenamiento S_{CO_2e} de los bosques (Ver **Sección 5.3**).

$$O_K = P_{CO_2e} (S_{CO_2e} + \Delta CO_2e)$$

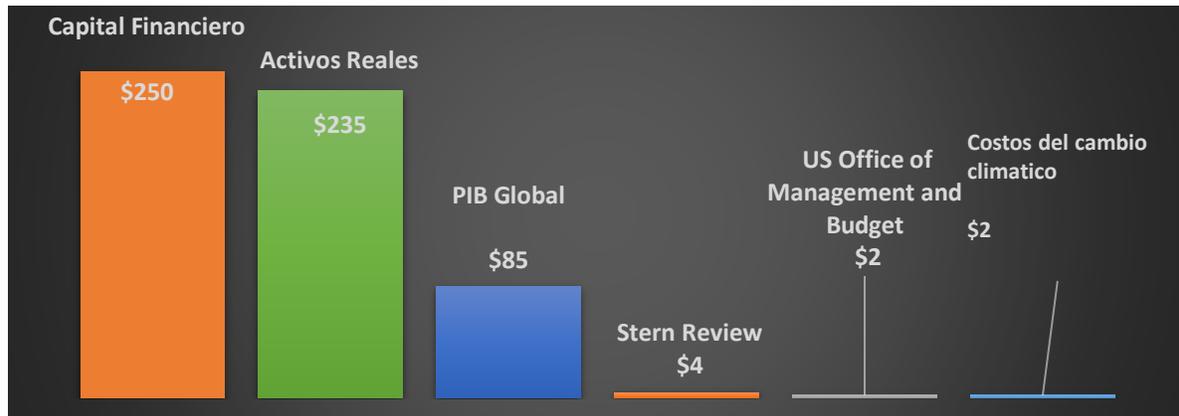
Con lo anterior es aclarado que los precios de referencia P_{CO_2e} corresponderían a la ponderación anual del total global de los certificados de emisiones mitigadas en toneladas de CO₂e. Por lo que estos precios se obtendrían luego del cálculo basado en el alcance de los emisores de los mercados de carbono, es decir podrían ser superiores o inferiores a los expuestos para obtener el precio de referencia ponderando su potencial de compensación definido como $(S_{CO_2e} + \Delta CO_2e)$.

Definiendo la formula como el modelo teórico de la disertación doctoral para los mercados de carbono basado en la eficiencia ambiental y financiera de las soluciones climáticas de la naturaleza.

5.5 Escenarios

El capital financiero global se compone de dinero, depósitos, bonos, patrimonios accionarios, fondos de inversión, etc; siendo estimado en 250 trillones dólares. Adicional a los activos reales (finca raíz y productos durables) por un valor aproximado de 235 trillones de dólares (Global Wealth Report 2021, Boston Consulting Group) Ver **Figura 11**.

FIGURA 11 CAPITAL FINANCIERO, PRODUCTIVIDAD Y COSTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

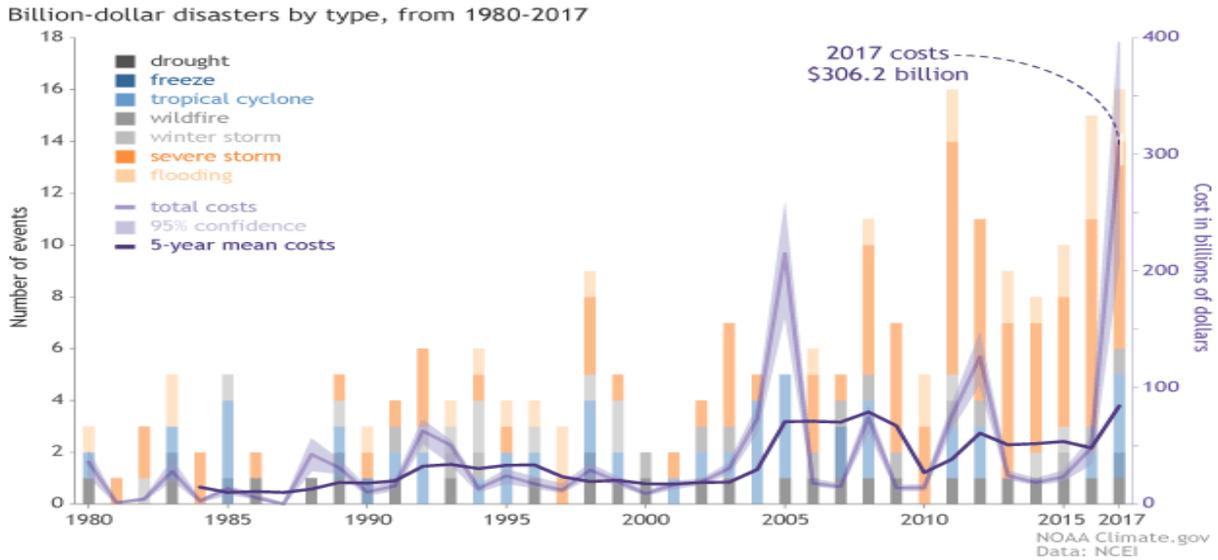


Fuentes: - The World Bank, Office of Management and Budget, Executive Office of the President. (2020, February 9). Budget of the United States Government, Fiscal Year 2023. Office of Management and Budget, Executive Office of the President. - Stern, N. (2006). STERN REVIEW: The Economics of Climate Change Executive Summary. October, 30(3) - Global Wealth Report 2021, Boston Consulting Group

Dentro de los 250 trillones de dólares del capital financiero se encuentran cerca de \$120 trillones de dólares de los mercados públicos de acciones donde las Américas participan con el 41%, la Unión Europea el 11%, China el 11%, Japón 5.5% y Hong Kong 5% (Global Equity Markets Primer SIFMA INSIGHTS, 2021), de otro lado se encuentran cerca de \$127 trillones de dólares en instrumentos de renta fija donde participan los Estados Unidos con un 39%, la Unión Europea con 19%, China 17% y Japón 10%.

Similarmente, *Swiss Re* la mayor compañía reaseguradora a nivel global reportó pérdidas por desastres naturales y por intervención humana por \$316 mil millones dólares entre 2018 y 2019 (CERES, 2020) Ver **Figura 12**.

FIGURA 12 COSTOS ESTIMADOS POR EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS EN LOS ESTADOS UNIDOS



Fuente: Imagen tomada de NOAA Climate.gov

Soluciones climáticas de la naturaleza

Limitación a la deforestación

Busca favorecer los servicios ecosistémicos: de la *biodiversidad* al mantener la continuidad de los bosques primarios; del *agua* mejorando la disponibilidad en irrigación, la mitigación de las sequías y la regulación de los hidro-sistemas; de los *suelos* reteniendo el agua y las propiedades biológicas asegurando la salud y la productividad de los bosques; y del *aire* por la filtración a través de los bosques favoreciendo su salud (Griscom et al., 2017).

Reforestación

Busca la plantación de los árboles favoreciendo los servicios ecosistémicos: de la *biodiversidad* creando corredores y fortaleciendo la conservación biológica; del *agua* mejorando la disponibilidad de irrigación, mitigación de las sequías y la regulación de los hidro-sistemas; de los *suelos* medida en el aumento de la fauna, donde los gusanos de tierra sobreviven exclusivamente en áreas de reforestación; y del *aire* por la filtración a través de los bosques favoreciendo la salud (Griscom et al., 2017).

Simulaciones

Conforme a los resultados se realizó la simulación de los precios del carbono bajo los escenarios de certificación de los proyectos de carbono por intervalos de 10 años para las soluciones climáticas de la naturaleza para proyectos con un horizonte de 30 años de duración.

Supuestos

(O_K) costos de oportunidad estimados en la renta anual promedio de una hectárea en un rango de los \$100 hasta los \$1,000 dólares según la evidencia empírica en los territorios de los países en desarrollo y las economías avanzadas, donde se señalado que podría estar cercano al 10% de valor de los predios. Según los reportes de los estimados de renta de los suelos agrícolas de Estados Unidos y Europa para un Costo Total de \$100,000 millones de dólares hasta \$1 trillón de dólares por año de acuerdo con la **Tabla 2**.

(S_{CO_2e}) El rango de la capacidad de almacenamiento de CO_{2e} se estableció entre 3 hasta 214 toneladas de CO_{2e} por hectárea conforme a la revisión bibliográfica de la **Sección 4.3** y el cálculo acumulado de la absorción (ΔCO_2e) para el final de cada certificación.

(ΔCO_2e) la tasa de absorción anual empleada se encuentra en un rango de 10 a 19 toneladas de CO_{2e} por hectárea de acuerdo con las fuentes del **Anexo 2** (The State of the World's Forests, 2000). (Bernal et al., 2018b). (Stoddard et al., 2021).

Ver **Tabla 9** con la simulación de los escenarios para el potencial de la restricción a la deforestación y la reforestación definido como $S_{CO_2e} + \Delta CO_2e$.

TABLA 9 PERIODOS DEL POTENCIAL DE LA RESTRICCIÓN A LA DEFORESTACIÓN Y LA REFORESTACIÓN DE LAS SOLUCIONES CLIMÁTICAS DE LA NATURALEZA $S_{CO_2e} + \Delta CO_2e$

Periodos de Certificación en Años	1-10	11-20	21-30
Promedio anual de ΔCO_2e en toneladas por hectárea de CO _{2e}	8,2	9.6	4
Almacenamiento acumulado S_{CO_2e} al final del periodo de certificación en toneladas por hectárea de CO _{2e}	82	178	218

El número de hectáreas de 500 a 1,000 millones de la simulación corresponden al rango absorción de 10 a 19 toneladas de CO_{2e} por año, logrando la acumulación de 9 a 14 gigatonnes de CO_{2e} por año, según el objetivo planteado en la **Sección 4.7** para los años 2040 a 2050 donde se busca la acumulación de 319 gigatonnes.

La simulación de escenarios para la reforestación de 500 hasta 1,000 millones de hectáreas se puede observar en la **Tabla 10**, donde fueron descartados los resultados con tasas de absorción anual por debajo de los 9 gigatonnes y por encima de los 14 gigatonnes según los estimados de mayor frecuencia observados en la caracterización de la reforestación de los bosques para los primeros 20 años.

TABLA 10 GIGATONES ALMACENADOS ANUALMENTE CONFORME AL NÚMERO DE HECTÁREAS Y LAS TASAS DE ABSORCIÓN DE BOSQUE

Gigatonnes de CO ₂ e por año	(ΔCO_2e) la tasa de absorción de toneladas por hectárea			
Hectáreas	10,0 Ton	13,0 Ton	17,0 Ton	19,0 Ton
500.000.000				9,5 Gt
600.000.000			10,2 Gt	11,4 Gt
700.000.000		9,1 Gt	11,9 Gt	13,3 Gt
800.000.000		10,4 Gt	13,6 Gt	
900.000.000	9,0 Gt	11,7 Gt		
1.000.000.000	10,0 Gt	13,0 Gt		

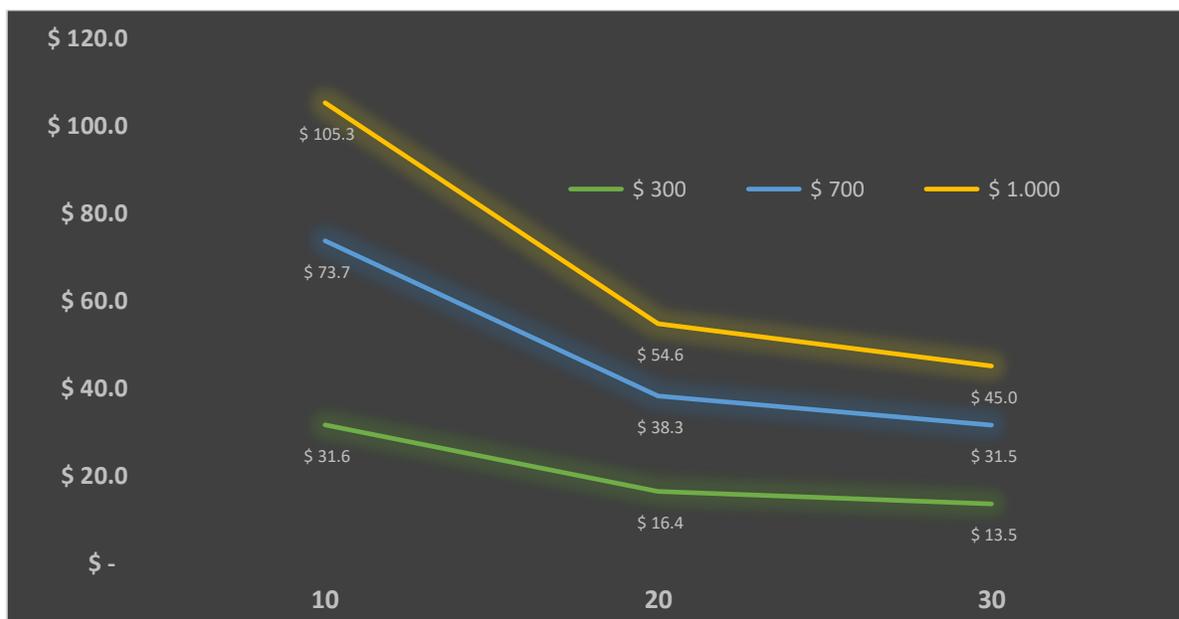
Fuente: estimaciones propias basadas en los escenarios de reforestación propuestos por (Griscom et al., 2017)

Finalmente se hace la estimación de los precios P_{CO_2e} conforme al modelo propuesto $O_K = P_{CO_2e} (S_{CO_2e} + \Delta CO_2e)$. Donde se aplicó el costo de oportunidad O_K de \$300, \$700, y \$1,000 dólares por año para la hectárea sujeta a los proyectos de las soluciones climáticas de la naturaleza en función de la capacidad de almacenamiento S_{CO_2e} y la tasa de absorción ΔCO_2e esperada hacia el momento de la certificación, en este caso cada 10 años ($t = 10, 20$ y 30). Los resultados son expuestos en la **Tabla 11** y la **Figura 13**.

TABLA 11 PRECIOS DEL CARBONO P_{CO2e} EN FUNCIÓN DEL POTENCIAL DE LAS SOLUCIONES CLIMÁTICAS DE LA NATURALEZA ($S_{CO2e} + \Delta CO2e$)

Año de certificación	10 años	20 años	30 años
Tasa de absorción $\Delta CO2e$	13 ton/ha/año	5 ton/ha/año	4 ton/ha/año
Capacidad de almacenamiento S_{CO2e}	82 ton/ha	178 ton/ha	218 ton/ha
Costo de oportunidad anual por hectárea en dólares O_K	Precio Carbono P_{CO2e}		
\$ 300	\$ 31,6	\$ 16,4	\$ 13,5
\$ 700	\$ 73,7	\$ 38,3	\$ 31,5
\$ 1.000	\$ 105,3	\$ 54,6	\$ 45,0

FIGURA 13 PRECIOS DEL CARBONO EN FUNCIÓN DEL POTENCIAL DE LAS SOLUCIONES CLIMÁTICAS DE LA NATURALEZA P_{CO2e} ($S_{CO2e} + \Delta CO2e$) PARA UN PERIODO DE 30 AÑOS SATISFACIENDO LOS COSTOS DE OPORTUNIDAD O_K



En la **Figura 13** ha sido posible observar que los precios podrían disminuir en función de un mayor número de certificados por hectárea en razón al aumento de las toneladas de CO_{2e} almacenadas y a su vez se mantendría el ingreso esperado por el tenedor del territorio objeto de la certificación, asimismo la conservación de los bosques podría favorecer por los volúmenes de certificación y los proyectos de restauración tendrían el incentivo de precios más altos.

Capítulo 6 Las iniciativas ambientales solidarias en Colombia bajo el marco de los principios del diseño organizacional de Elinor Ostrom

A continuación, se encuentra artículo académico sobre la experiencia *in situ* de las iniciativas ambientales de las organizaciones solidarias en Colombia, que entre sus líneas operativas han optado por la participación en los mercados de carbono. Así bajo el marco metodológico de Elinor Ostrom planteado en su libro *Governing the Commons*, fue aplicada la validación cualitativa no experimental del diseño organizacional requerido para el desarrollo de las acciones colectivas en favor de los proyectos ambientales; lugar donde dichos principios propenden por la longevidad y la asociatividad en la gestión de los recursos de uso común. Siendo la comprobación de la evidencia empírica entre los relacionamientos ambientales y las estrategias de sostenibilidad. Con ello se pretendió acercar al lector sobre las implicaciones que podrían ser consideradas al desarrollar los proyectos ambientales bajo los contextos de las acciones colectivas, los territorios colectivos y las comunidades de los bosques que en su conjunto hacen parte del capital social según lo explorado sobre las iniciativas adelantadas en Colombia.

Autores

Marietta Bucheli-Gomez Ph. D.

Juan Fernando Álvarez-Rodríguez Ph. D.

Michel Casas-Cuestas

Resumen

Colombia ha iniciado su proceso de participación en los proyectos ambientales de la agenda global de las Naciones Unidas para la mitigación del cambio climático y la protección de la biodiversidad. Por ello las organizaciones del sector solidario han formulado proyectos buscando alinearse con los programas regionales y propender por el liderazgo en el desarrollo rural a través de las iniciativas ambientales solidarias. Entre ellas se encuentran las organizaciones *Canapro Ambiental*, *Cooperación Verde* y *Cootregua* por su participación y acompañamiento a los proyectos ambientales locales. Las cuales son el foco del presente estudio que ha identificado los elementos

comunes relacionados a los principios del diseño organizacional planteados por Elinor Ostrom. Luego, fue posible corroborar la relevancia de los principios del diseño organizacional como metodología de valoración cualitativa para las iniciativas ambientales solidarias, en favor de los objetivos de la sostenibilidad y la gobernanza en los horizontes del largo plazo, así como la formulación de variables de evaluación institucional.

Palabras clave

Economía solidaria, sostenibilidad, diseño organizacional, cambio climático y restauración ecológica.

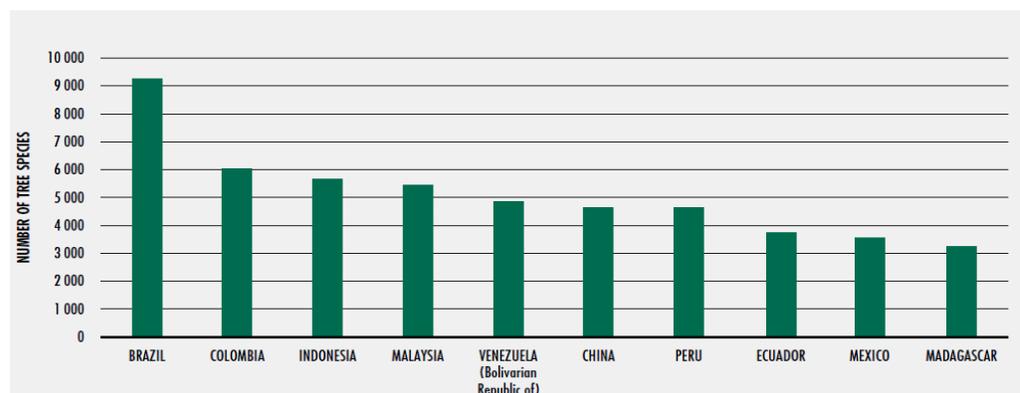
Contexto del uso del suelo en Colombia

La extensión de Colombia corresponde a 207 millones de hectáreas, de las cuales 114 millones corresponden al área continental (IDEAM-ONU-REDD) ubicándose en la esquina noroccidental de Sudamérica con acceso a los océanos Pacífico y Atlántico.

Dimensiones de los Bosques

Colombia es el segundo país con el mayor número de especies de árboles en la Tierra con alrededor de 6,000 como se puede observar en la **Figura 14** (FAO,2020).

FIGURA 14 PAÍSES CON EL MAYOR NÚMERO DE ESPECIES DE ÁRBOLES EN EL PLANETA



Fuente: FAO 2020

Los tipos fisionómicos generales y su extensión original en el país se describen a continuación en la **Tabla 12**:

TABLA 12 EXTENSIONES GENERALES DE LAS COBERTURAS

Tipo	Extensión en Hectáreas	%
Bosques	94.146.930	82.5%
Arbustales	1.543.390	2.2%
Sabanas	14.128.937	12.6%
Paramos	2.291.240	2.7%

Fuente: *Estado de los Ecosistemas Colombianos: una aplicación de la metodología de la Lista Roja de Ecosistemas (Vers2.0)* Etter A., Andrade A., Saavedra K., Amaya P. y P. Arévalo 2017.

Sin embargo, en la actualidad el 40% de los suelos (45.379.058 hectáreas) presenta algún nivel de degradación por erosión incidiendo en la cobertura vegetal original conforme a las extensiones afectadas, como ha sido presentado en la **Tabla 13**.

TABLA 13 EXTENSIONES DE SUELOS AFECTADAS POR LA EROSIÓN

Afectación por erosión	Extensión en hectáreas	%Participación respecto al total nacional
Ligera	22.821.889	20%
Moderada	19.222.575	17%
Severa	3.063.204	3%

Fuente: IDEAM 2021 (SIAC, n.d.)

Lo que ha dejado como resultado que el 51.7% (58,964,543 hectáreas) del territorio colombiano fuera categorizado como área de bosque natural (IDEAM Boletín 06, 2015), teniendo la siguiente distribución dentro del área continental de las regiones de Colombia como aparece en la **Tabla 14**.

TABLA 14 EXTENSIONES DE BOSQUE EN COLOMBIA POR REGIONES

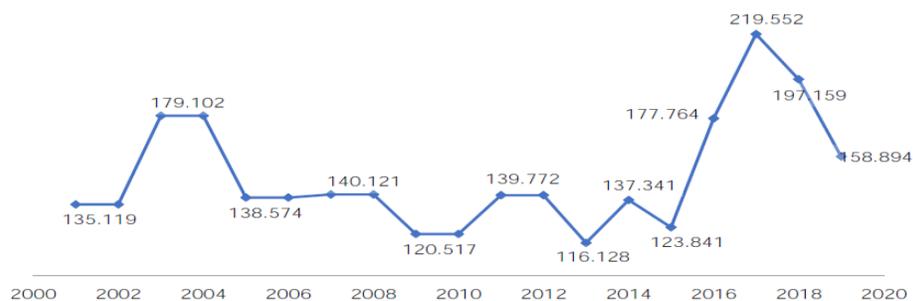
Región	Extensión en millones de hectáreas	% de participación
Amazonía	39.7	67%
Los Andes	10.5	18%
Pacífico	5.3	9%
Orinoquía	2.1	4%
Caribe	1.7	3%
Total	59	100%

Fuente: IDEAM-ONU-REDD (2018c)

Áreas de deforestación

La deforestación en Colombia en los últimos 10 años se ha mantenido en un rango de entre las 120 mil hectáreas y las 220 mil hectáreas (DNP, 2020) por año siendo un factor recurrente en la pérdida de los boques. Donde se estima que entre el año 2000 y el año 2019 se perdieron 2,8 millones de hectáreas de bosque aproximadamente, ver **Gráfica 15**.

FIGURA 15 DINÁMICA HISTÓRICA DE LA DEFORESTACIÓN EN COLOMBIA (HECTÁREAS POR AÑO)



Fuente: DNP (2020), a partir de datos del (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono, 2020).

Imagen tomada del Documento *CONPES 4021 Política nacional para el control de la deforestación y la Gestión sostenible de los bosques (DNP, 2020)*.

Se estima que en Colombia cerca de 1.200.000 personas dependen económicamente del uso de los productos forestales no maderables y que la población artesana podría ascender a las 350.000 personas (DNP, 2020).

Expansión de la frontera

Se enumeran tomando en cuenta las causas identificadas por el estudio del IDEAM (IDEAM-ONU-REDD, 2018) seleccionando aquellas que tienen una mayor participación respecto a las extensiones en hectáreas y la participación en el PIB de Colombia para un total de 45.4 millones de hectáreas degradadas en el país.

La frontera agrícola

La Resolución 261 de 2018, expedida por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, define la frontera agrícola nacional como el límite que separa las áreas en donde se desarrollan las actividades agropecuarias de las áreas protegidas, de manejo especial y de importancia ecológica (DNP, 2020). Donde la actividad ganadera mantiene una ocupación de aproximadamente 34 millones de hectáreas a una tasa de uso de 0.6 hectáreas por cabeza de ganado, participando del 1.6% del PIB nacional, mientras son empleadas cerca de 5 millones de hectáreas para la agricultura (IDEAM, 2021)(SIAC, n.d.).

La actividad minera

La explotación de minas y canteras (incluyendo el petróleo y el carbón) aportarían alrededor del 6% del PIB siendo explotadas 1.2 millones de hectáreas, correspondientes al 1.1% del suelo

continental del país, con *sub-sectores* de mayor participación dedicados a los materiales para la construcción (57%) y en segundo lugar el carbón (17%) (*Así Es Nuestra Colombia Minera | Agencia Nacional de Minería ANM*).

Los cultivos ilícitos

Los cultivos ilícitos han mantenido una ocupación de entre las 154,000 y las 212,000 hectáreas (SIMCI) dando un margen de resiembra de hasta el 30% participando con alrededor del 0.4% del PIB en el periodo 2016-2019 (SIMCI UNODC, 2018) (DANE, 2019) (*¿Cuánto Ha Bajado Extensión de Cultivos Ilícitos En Colombia? | El Nuevo Siglo*).

Propiedad de los territorios

Según el IGAC para el año 2009 se presumía que el Estado poseía cerca del 20.6% de los suelos, los territorios colectivos 30.5%, el SINAP 3.7% y 0.5% otras comunidades; luego el remanente 44.7% corresponde a la propiedad privada. Sobre los suelos de propiedad privada el 52.1% corresponden a grandes propiedades, 18.1% a propiedades medianas, 19.1% a pequeñas propiedades y 10.6% a microfundios (de los cuales el 80% de los propietarios se consideraban en la pobreza PNUD 2011) (*¿A Quién Le Pertenece La Tierra En Colombia, y Cómo Se Divide El Territorio Por Su Uso?*).

Otras figuras de gran importancia para la gestión de los bosques son los territorios colectivos, donde se encuentra aproximadamente el 53% de los bosques naturales del país, de los cuales el 46% corresponde a los resguardos indígenas y el 7,3% a los territorios colectivos de las comunidades afrocolombianas (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

A continuación, se hará la aproximación financiera a los usos del suelo y su productividad conforme a los datos agregados en la participación del Producto Interno Bruto en Colombia, y a la información disponible con el objetivo de representar sus principales dimensiones, **Ver Tabla 15**.

TABLA 15 USO FINANCIERO DEL SUELO EN COLOMBIA

Uso	Palma	Café	Ganadería	Agricultura	Minería y Canteras	Cultivos de coca
Área en millones de hectáreas	0,6 M Ha	0,85 M Ha	34 M Ha	5 M Ha	1,2 M Ha	0,18 M Ha
Aporte productivo (PIB) en miles de millones de dólares (Billones en inglés)	\$ 1,05 B USD	\$2,2 B USD	\$4.3 B USD	\$12 B USD	\$12,3 B USD	\$2,3 B USD
% Part. PIB	0.4%	0.8%	1.7%	4.7%	4.8%	0.9%
Productividad financiera por hectárea en dólares.	\$1.780 USD	\$2.565 USD	\$125 USD	\$2.392 USD	\$10.297	\$12.667

Fuentes: Fedepalma 2021, Federación Nacional de Cafeteros, DANE 2021 SIMCI UNODC, 2018

Mercados de Carbono

Colombia se encuentra entre los primeros cinco países en el desarrollo de los proyectos de carbono forestal a nivel mundial conforme a las áreas de extensión y el número de certificados en proceso de emisión y colocación, ver **Tabla 16**. Sin embargo, aún es incipiente el mercado global al estar en proceso de incubación dentro de los mercados de capitales financieros y se espera que su desarrollo coincida con los objetivos de las Naciones Unidas para los años 2030 y 2050.

TABLA 16 PRINCIPALES PAÍSES PARTICIPANTES DE LOS MERCADOS DE CARBONO

Principales Países	Área en hectáreas en proceso de certificación	Número de certificados de carbono emitidos
Brasil	24,618,613	1,012,335,893
Congo, the Democratic Republic of the	21,307,376	1,016,889,078
Colombia	14,197,355	1,472,783,760
Indonesia	10,330,968	749,837,116
Perú	9,722,541	135,692,359
China	4,544,471	414,147,688
Kenia	2,979,668	168,147,233
Zambia	1,800,431	92,348,609
Cameroon	1,231,272	298,672
Guatemala	1,177,699	78,885,344
Madagascar	1,177,303	78,316,799
Cambodia	909,764	144,373,499

Fuente: Atmadja, S.; Komalasari, M.; Alusiola, R.; Barboza, I.; Sartika, L.; Theresia, V.; Simonet, G. 2023. The International Database on REDD+ projects and programs Linking Economics, Carbon and Communities (ID-RECCO) - Project tables, V.5.0

Introducción

Luego conforme al contexto anterior, ha sido relevante para Colombia el poder desarrollar sus actividades de restauración y conservación de la naturaleza, como uno de los pilares hacia la búsqueda de la salubridad y expansión de la oferta productiva del uso del suelo. En congruencia con

lo planteado por los organismos multilaterales y los autores del *capital social* quienes han concluido lo siguiente.

- El capital social tiene un rol esencial en la administración de la respuesta global al cambio climático (IPCC, 2018).
- La economía social y solidaria a través de sus empresas asume de manera *implícita* su participación en la *acción por el clima* dentro de los *objetivos de desarrollo sostenible* (Alarcón Conde & Rodríguez, 2020).
- El mayor potencial del rol del *capital social* se encuentra en su capacidad de lograr el paso de la *vulnerabilidad* a la *adaptación* climática (Szreter & Woolcock, 2004). Desde las acciones preventivas más allá de las inherentes al manejo exclusivo de las emergencias y las catástrofes.

De este modo, los estudios contemporáneos de los marcos organizacionales han buscado comprender las relaciones entre las acciones colectivas y las instituciones, al igual que las interacciones que puedan tener las normas y los sistemas de operación (Blomquist & deLeon, 2011). Por lo anterior el presente estudio propone el relacionamiento entre las iniciativas ambientales de las organizaciones solidarias y los principios del diseño organizacional planteados por Elinor Ostrom, donde el eje reflejaría la robustez o debilidad de estos relacionamientos.

Conforme a lo mencionado anteriormente, la metodología planteada por Elinor Ostrom en su libro *Gobernando a los Comunes* (Ostrom, 2015) ha atestiguado la significancia las organizaciones estudiadas a través de sus acciones colectivas en términos de longevidad (+100 años) y el alcance al desarrollo de los principios del diseño organizacional (10-15,000 personas). De esta manera se enmarca lo que ha sido el esfuerzo naciente de las organizaciones solidarias *Canapro Ambiental*, *Cooperación Verde* y *Cootregua*, identificando el potencial por profundizar las actividades solidarias y participativas de las organizaciones en los proyectos ambientales.

Metodología

Para el desarrollo de la metodología sobre las acciones colectivas, se acudió a la propuesta por Elinor Ostrom con la agrupación de los individuos que buscan a través de la iniciativa recíproca alcanzar los beneficios de una acción colectiva. Donde algunos individuos participan en mayor medida que otros en favor del reforzamiento a la cooperación y evitar así su debilitamiento, a través

de la autoridad de los individuos y sus gobernanzas que se enfocan en dar solución a los problemas manifestados por las acciones colectivas (Ostrom, 2015).

En este sentido, fue posible identificar el proceso de formulación aplicado a las iniciativas ambientales por parte de las organizaciones solidarias: *Canapro Ambiental*, *Cooperación Verde* y *Cootregua*. Enmarcando la gobernanza de las organizaciones bajo los principios del diseño organizacional planteado por Ostrom en su libro *el Gobierno de los Bienes Comunes*, identificando el relacionamiento entre la evidencia empírica y la posterior validación teórica (ver **Figura 16**).

FIGURA 16 MAPA TEÓRICO 1



Bajo el marco anterior, se adoptaron las instrucciones de aplicabilidad para el análisis de la gestión de los recursos de uso común establecidas por E. Ostrom. Bajo el conjunto de variables situacionales que permiten una mayor precisión sobre el uso de la metodología para los estudios empíricos (Ver **Tabla 17**).

A través de las organizaciones cooperativas y solidarias fue posible identificar que su origen parte de la acción colectiva de sus asociados, espacio que ha permitido hacer la evaluación de la metodología aplicada por Ostrom a las iniciativas ambientales de las cuales ha participado, así mismo se observó que las variables situacionales de la metodología permiten hacer una mayor aproximación a las actividades desarrolladas en función de las iniciativas ambientales.

TABLA 17 VARIABLES SITUACIONALES

- Número de apropiadores.
- Tamaño del recurso de uso común.
- Variabilidad temporal y espacial de las unidades de recursos de uso común.
- Condición actual del recurso de uso común.
- Condiciones del mercado para las unidades de recurso.
- Cantidad y tipos de conflicto.
- Disponibilidad de información.
- Reglas *statu quo* en uso.
- Reglas propuestas.

A partir de las entrevistas a profundidad⁶ en campo se procedió a identificar el rol de las organizaciones solidarias respecto a su entorno, las actividades ambientales, los procesos administrativos y los sistemas de gobernanzas internas y externas. Luego, con la información obtenida se procedió a generar los marcos de referencia conforme los principios del diseño organizacional de Ostrom y así realizar la evaluación categórica cualitativa (Ver **Tabla 18** y **Tabla 19**).

TABLA 18 PRINCIPIOS DE DISEÑO ORGANIZACIONAL DE E. OSTROM

Organización solidaria	CANAPRO ambiental	Cooperación Verde	Cootregua
Límites claros y membresía	Si	Si	Si
Reglamentos congruentes	Si	Si	Si
Espacios de decisión colectiva	SI	SI	SI
Supervisión	SI	SI	SI
Sanciones graduales	SI	SI	SI
Mecanismos de resolución de conflictos	SI	SI	SI
Reconocimiento al derecho de asociación	SI	SI	SI
Empresa ecosistémica	SI	SI	SI

TABLA 19 VARIABLES SITUACIONALES DE E. OSTROM

Evaluación de los beneficios para una elección institucional			
Variables Situacionales de E. Ostrom	Canapro Ambiental	Cooperación Verde	Cootregua
Numero de apropiadores.	55,000	65 cooperativas	11,000
Tamaño del recurso de uso común.	7,000 hectáreas	5,000 hectáreas	Municipios: 6 sedes en Guaviare y 2 en Guainía
Variabilidad temporal y espacial de unidades de recursos de uso común.	Extensiones fijas Empleados 30-100	Extensiones fijas Empleados 50-100	Sedes flexibles. 40 empleados
Condición actual del recurso de uso común.	Estable en crecimiento.	Estable en crecimiento.	En crecimiento.
Condiciones del mercado para las unidades de recurso.	Economías de libre mercado e institucionalidad democrática. Economías de frontera.	Economías de libre mercado e institucionalidad democrática.	Economías de libre mercado e institucionalidad democrática. Economías de frontera.
Cantidad y tipos de conflicto.	Región fronteriza con Venezuela.	Región petrolera en proceso de adaptación al posconflicto.	Región fronteriza con Venezuela y Brasil.
Disponibilidad de información.	Amplia y suficiente.	Amplia y suficiente.	Amplia y suficiente.
Reglas <i>statu quo</i> en uso.	Reglamentos Cooperativos	Reglamentos internos de la empresa privada.	Reglamentos Cooperativos
Reglas propuestas.	Expansión operativa en predios.	Expansión en extensión y población objetivo.	Expansión en sedes regionales.

⁶ Fueron visitadas las regiones de Puerto Gaitán, Puerto Carreño e Inírida en el área de los llanos orientales de Colombia. Tomando entrevistas a funcionarios, asociados y directivos a través de un formulario de preguntas desarrollado por los autores para las visitas. Donde se compilaron cerca de cincuenta entrevistados y se dio el espacio de reflexión sobre el rol de las organizaciones dentro de sus comunidades validando la funcionalidad ecosistémica de la metodología de Ostrom.

Iniciativas Ambientales Solidarias

CANAPRO Ambiental

Desde 1958 inicio sus actividades la Casa Nacional del Profesor Sociedad Cooperativa (CANAPRO), cuyo objetivo principal es el crédito, las actividades educativas, recreativas y el turismo, buscando atender las expectativas de sus asociados. Para el año 2022 tenían cerca de 53,000 asociados y una colocación de crédito cercana a los \$40 millones de dólares por año y activos por \$150 millones de dólares.

Dentro de sus organismos de gobernanza se encuentran la Asamblea de Delegados (+100 representantes), el Consejo de Administración (9 miembros), la Junta de Vigilancia (3 principales), la Junta Directiva (1 Gerente, 19 Directores de Área y 2 Rectores) y 7 Comités Administrativos.

En el año 2008 la Cooperativa CANAPRO buscaría implementar su proyecto ambiental con la adquisición de alrededor de 7,000 hectáreas en el municipio de Puerto Carreño en el departamento del Vichada dedicados al turismo, la educación, la protección de las fuentes hídricas, la reforestación, la apicultura y la transición a las energías renovables. Logrando emitir cerca de 18,000 bonos de carbono y realizando los proyectos de desarrollo de productos basados en la apicultura, el marañón y los planes reforestales en favor de la biodiversidad. Destacando la participación en los proyectos conservación de la danta, el tigre mariposo, el puma y la sostenibilidad de los hábitats de los ríos Ramsar y Bitá. Para finales del año 2023 empleaba a alrededor de 30 personas entre el personal administrativo y los operarios, significando la presencia comercial y social dentro de uno de los territorios más alejados del centro del país empero ha sido considerado uno de los puntos geográficos clave, por ser una de las puertas de acceso a la Amazonía y basar parte de su economía en las relaciones fronterizas con Venezuela y Brasil.

De esta manera CANAPRO Ambiental ha logrado generar y acumular experiencias en capacitación y desarrollo de personal apto para las actividades productivas del país al ser certificado por el Estado a través del Instituto Colombiano Agropecuario ICA. Así basado en la experiencia de la plantación de especies maderables y nativas, la formulación e implementación de proyectos basados en el marañón, incluyendo las etapas de selección, horneado y empaque. Logrando generar alternativas de valor agregado en las áreas rurales del país.

Finalizando, consolidaron las operaciones de crédito en el centro urbano y lograron posicionarse como una opción solidaria en las regiones al liderar las iniciativas ambientales que

hasta el momento venían siendo desarrolladas por las empresas privadas y las organizaciones sin ánimo de lucro.

Cooperación Verde

Cooperación Verde nació como la iniciativa de 25 organizaciones solidarias que impulsaron el programa de desarrollo sostenible para la economía social y solidaria. Para ello en el año 2009 conformaron la empresa privada Cooperación Verde a través de los aportes solidarios con el objetivo de impulsar los proyectos ambientales a nivel regional, ejecutando la compra de cerca de 5,000 hectáreas en el área del municipio de Puerto Gaitán en el Departamento del Meta.

En el proyecto han logrado la plantación de 2 millones de árboles y la restauración de 2,000 hectáreas favoreciendo la producción de maderables sostenibles, biomasa para la generación de energía, y los desarrollos en apicultura y ecoturismo. Asimismo, han mantenido niveles de empleabilidad de entre 30 y 100 personas conforme a las necesidades de los proyectos, el cual ha contemplado la mecanización de los procesos a escala y acceder a la financiación del sistema financiero tradicional, así como la venta de certificados forestales y de carbono por cerca de un millón de dólares. Con los recursos obtenidos han incursionado en los productos de valor agregado como son la producción de láminas de triplex y aglomerados, buscando atender el consumo nacional y los clientes multinacionales.

Para el año 2023 contaban con 65 organizaciones de la economía social y solidaria dentro del patrimonio de Cooperación Verde, obteniendo múltiples reconocimientos como estar entre los 500 mejores proyectos latinoamericanos verdes, ganador en los premios BIBO en la categoría de construcción de paisajes sostenibles (patrocinado por WWF, con jurados del Instituto Humboldt y el Instituto de Investigaciones Amazónicas). Igualmente se ha destacado su labor en los procesos de reinserción social de las víctimas del conflicto armado en Colombia, así como los diálogos con las comunidades indígenas, específicamente los indígenas Sikuani.

Respecto a la gobernanza, a la Asamblea Anual de Socios asisten los directores generales de las organizaciones solidarias, al igual que son nombrados los delegados para las sesiones mensuales de la junta directiva donde asisten los revisores fiscales y los gerentes, realizando la rotación de representantes cada dos años.

Para finalizar, Cooperación Verde ha sido reconocido como pionera en el esquema de la empresa privada financiada por el capital solidario lo que le ha permitido participar de las

oportunidades de los mercados, así como liderar los procesos sociales y de reconciliación en la región. Hacia futuro han proyectado el potencial de inversión por 10 a 20 millones de dólares para proyectos de expansión a 10,000 hectáreas adicionales y el desarrollo del trabajo conjunto con las comunidades indígenas en los territorios colectivos.

Cootregua

Cootregua nace en 1988 a través de la asociación de empleados de la educación en Inírida, en el departamento de Guainía y el Padre Antonio Bayter, quienes conformaron la Junta Directiva de la iniciativa liderada por la señora Maria Isbelia Gutiérrez. Lo que ha favorecido el crecimiento de los activos a través de la colocación de créditos basados en el ahorro de sus asociados por más de 30 años. Para el año 2023 acumulaba activos por 25 mil millones de pesos con 40 empleados y 11,000 asociados.

La prioridad inicial de las actividades sociales de Cootregua fue al acompañamiento a las microempresas, la capacitación de la población y el fomento a las actividades deportivas. Luego, las actividades se complementarían con los servicios de Tutoría de Cootregua sobre los temas de emprendimiento, finanzas y gestión administrativa para estudiantes y asociados. Luego la señora Maria Isbelia Gutiérrez ha mantenido el liderazgo de Cootregua sobre la educación financiera en el municipio atendiendo a la población en cada una de sus etapas del proyecto de vida, al igual que el acompañamiento personalizado a sus clientes donde es destacable su labor conforme a las distancias y los medios de comunicación entre los pobladores, basados principalmente en el transporte por río y el acceso a internet satelital.

Luego Cootregua ha logrado facilitar los procesos de desmarginalización social de la población desplazada por el conflicto interno y la atención prioritaria al empoderamiento de la mujer, buscando la mejora de la calidad de vida de sus pobladores basado en los pilares de la familia, el hogar y la generación de empleo. Asimismo, la atención a la población indígena por parte de Cootregua ha sido esencial para las etnias Puinave y Kurripaco, logrando proveer servicios financieros a los emprendimientos locales y a los beneficiarios de los certificados del carbono en la región.

Lo anterior le ha permitido ser un agente catalizador de los procesos de inclusión social para las poblaciones más alejadas de los procesos de la economía formal, al igual que propender

por mejorar las condiciones de los pobladores y facilitar la incipiente actividad ambiental en el territorio.

Resultados

Conforme a la metodología propuesta por Ostrom en su libro *Governing the commons* (Ostrom, 2015) en los capítulos sobre *el estudio de las instituciones en situaciones concretas* y *el análisis de recursos de uso común de larga duración*; fueron creadas las **Tablas 18 y 19** de los principios de diseño organizacional de Ostrom para analizar sus componentes conforme al estudio realizado en campo.

Límites claros y membresía: para las organizaciones estudiadas se encontraron en los estados financieros y los reportes de los directivos la claridad sobre la participación de los asociados tanto en número como aporte. Existiendo mecanismos estatutarios sobre la denominación y constitución jurídica de las partes, lo anterior en razón a la regulación específica de la actividad de las organizaciones solidarias en Colombia, la cual exige los reconocimientos de los aportantes en función de la actividad cooperativa.

Reglamentos congruentes: las organizaciones solidarias hacen parte del ecosistema organizacional consolidado del país. Donde se incluyen los comités de vigilancia, financieros, estratégicos, educativos, entre otros los cuales permiten la participación activa de los delegados (representantes de los asociados) en cada uno de los estamentos de la organización. Asimismo, los reglamentos se encuentran alineados a los principios cooperativos internacionales atendiendo las tendencias regulatorias multilaterales y a su vez aplicándolas a los contextos locales. Sin embargo, en la revisión de los reglamentos es importante destacar que aún las normas son genéricas y amplias, por lo que surge la incertidumbre si podría ser aún más específicas sobre el rol de la función solidaria respecto a los temas ambientales y sociales, aunque es comprensible que las temáticas aún están en el desarrollo de un marco global de construcción.

Espacios de decisión colectiva: dentro de las organizaciones estudiadas se identificó un sólido sentido de pertenencia y atención a los organismos de control internos y externos. Siendo factores apalancadores de la identidad del sector cooperativo y solidario en Colombia, incluso a pesar de las distancias geográficas se encontró en diversos niveles organizacionales el acato por los principios del sector. Con lo anterior los directivos fueron enfáticos en la atención que prestan a cada una de las juntas de administración por las cuales son supervisados y la importancia por

mantener un sistema de reporte continuo a los delegados y asociados por vías de comunicación tanto públicas como internas.

Supervisión: las organizaciones estudiadas hacen parte del ecosistema de la economía social y solidaria, donde existe la Superintendencia de la Economía Solidaria, la cual realiza los procesos de vigilancia y regulación a las actividades, siendo reconocida su actuación, así como cada una de las normativas que son emitidas. Asimismo, a nivel interno existen diversos organismos de control interno que procuran la actualización normativa y participan en el dialogo con los agentes de las políticas públicas como el Departamento Nacional de Planeación, Servicio Nacional de Aprendizaje, entre otros. Igualmente es importante destacar que, en el caso del desarrollo de actividades interdisciplinarias, las organizaciones atienden a las regulaciones ambientales locales, como ha sido el caso de las actuaciones con las Corporaciones Autónomas Regionales y representantes del Ministerio de Ambiente.

Sanciones graduales: en este principio no se logró observar mecanismos claros o estandarizados sobre su gestión. Sin embargo, se logró evidenciar los correctivos oportunos en las actuaciones de los directivos, donde las evaluaciones de desempeño tenían consecuencias en las contrataciones y en las actividades desempeñadas.

Mecanismos de resolución de conflictos: cada una de las organizaciones mantienen los canales de comunicación entre los asociados, delegados y funcionarios, los cuales son regulares y abiertos. En estos espacios se dispone del dialogo y registro de los eventos asociados a los conflictos internos y externos, sin embargo, no fue posible identificar con claridad el manejo de las consecuencias o efectos sobre estas situaciones. Indicando la necesidad por establecer un programa para el seguimiento y cierre a estos procesos, los cuales permiten a los organismos de control mantener el reporte sobre la gestión realizada por la organización, así como el potencial de insumo que podría tener para la gestión en el caso de presentarse eventos similares.

Reconocimiento al derecho de asociación: Dada la condición de las organizaciones estudiadas que hacen parte del ecosistema de la Economía Social y Solidaria, el derecho a la asociatividad hace parte de los principios cooperativos internacionales, por ello hace parte intrínseca de las actividades y fundamentos organizacionales.

Empresa ecosistémica: cada una de las organizaciones estudiadas hacen parte de los ecosistemas regionales, donde se identificó con claridad el rol de liderazgo de Cootregua en el

desarrollo de la inclusión financiera en los municipios donde actúa, lo cual le ha permitido mantenerse como un referente de bancarización en el Amazonas, así como su participación en el dialogo activo con las comunidades indígenas del territorio. Igualmente, CANAPRO ambiental ha mantenido un rol participativo en los estamentos públicos y privados, como fue el caso de su proceso de asociatividad con otras tres organizaciones privadas para el logro de las certificaciones de carbono. Finalmente, Cooperación Verde se destaca por su liderazgo en los procesos de inclusión social donde ha logrado congregar en sus espacios laborales a las víctimas del conflicto y la población desplazada, dándoles la oportunidad de desarrollar sus proyectos de vida en el contexto rural, siendo uno de los procesos de mayores dificultades para la región de los llanos; en razón a los procesos de restitución de tierras y las actividades ilícitas. Por lo anterior las organizaciones participan activamente de sus ecosistemas a pesar de las limitaciones presupuestales de capital económico y humano.

Discusión

El presente artículo ha permitido corroborar empíricamente la metodología formulada por Ostrom en su libro *Governing the Commons*, como un aporte a la discusión académica, así como la validación de su aplicación a los emprendimientos de la economía social y solidaria, espacio donde los autores hacen su aporte como guía metodológica para los proyectos ambientales.

Respecto a las limitaciones del estudio es importante comentar que aún es necesario acceder a un mayor número de organizaciones que se encuentren interrelacionadas a las iniciativas ambientales respecto a las que fueron el objeto de estudio. Lo anterior por que podría dar un mayor espectro sobre las dinámicas organizacionales a nivel externo y lograrían identificar las debilidades sobre el área de la gobernanza. En tanto el presente estudio se restringió al personal interno, asociados y delegados.

Asimismo, es deseable establecer un rango categórico al nivel de robustez de la apropiación de los principios de diseño organizacional de Ostrom, pero no fue posible debido a la escala y los recursos del presente estudio, el cual se realizó dentro de un espacio exploratorio. Por lo que es sugerido profundizar en cada uno de los principios de diseño y en lo posible con un mayor número de organizaciones.

Finalmente, es importante destacar que cada uno de los principios a pesar de ser satisfactorios basados en la evidencia exploratoria, es necesario formular en el futuro una

metodología que logre abordar de manera explícita los temas ambientales a pesar de la incertidumbre teórica en la literatura académica.

Conclusiones

Los principios de diseño organizacional planteados por Ostrom son congruentes con la actividad ambiental de las organizaciones solidarias *Canapro Ambiental*, *Cooperación Verde* y *Cootregua* como fue observado en las **Tablas 18 y 19** donde fue expuesta la confirmación de los principios de diseño organizacional de Ostrom aplicados a las organizaciones objeto de estudio.

Luego fue posible vislumbrar los espacios de mejora en las organizaciones sobre los mecanismos de resolución de conflictos y las sanciones graduales, donde los espacios de decisión colectiva logran formular las gobernanzas explícitas sobre estos principios de diseño organizacional.

Concluyendo sobre la disposición de la aplicación de los principios de diseño organizacional de Elinor Ostrom a la comunidad académica, como medio de validación cualitativa para el desarrollo de las organizaciones que son resultado de las acciones colectivas, como ha sido el caso de las empresas del sector de la economía social y solidaria expuestas en el artículo.

Recomendaciones

Sobre los escenarios identificados para la toma de decisiones se plantean los siguientes:

- Evaluación del costo de oportunidad de la venta de los proyectos ambientales buscando la liquidez para las organizaciones solidarias.
- Mantener la operación en función de los ingresos actuales como medida de control al desempeño y conservar la expectativa en la valorización de los activos.
- Dar alcance a la potencialización del uso de suelo a través de las inversiones intensivas del capital para un mayor dinamismo en la escala.

Conforme a lo obtenido es importante anotar que las organizaciones solidarias en las iniciativas ambientales podrían mantener su rol de catalizador entre el sector privado y público. Logrando conformar la masa crítica requerida para el establecimiento de los ecosistemas organizacionales basados en los principios de diseño Elinor Ostrom.

Referencias bibliográficas

Armenteras, D., González, T.M., Meza, M., Ramírez-Delgado, J.P., Cabrera, E., Galindo, G., Yepes, A. (Eds). 2018. Causas de Degradación Forestal en Colombia: una primera aproximación. Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia-IDEAM, Programa ONU-REDD. Bogotá D.C., Colombia., 105 pág.

FAO and UNEP. 2020. The State of the World's Forests 2020. Forests, biodiversity and people. Rome. <https://doi.org/10.4060/ca8642en>

DEGRADACION DEL SUELO - IDEAM. (n.d.). Retrieved June 26, 2024, from <http://www.siac.gov.co/degradacion-del-suelo>

Sexto Boletín de Alertas Tempranas de Deforestación. IDEAM Bulletin 06. 2015

Departamento Nacional de Planeación. (2020). CONPES 4021 Política nacional para el control de la deforestación y la gestión sostenible de los bosques Bogotá, Colombia.

Así es nuestra Colombia minera | Agencia Nacional de Minería ANM. (n.d.). Retrieved June 26, 2024, from <https://www.anm.gov.co/?q=Asi-es-nuestra-Colombia-minera>

Solo se está aprovechando 13,5% de las 39,2 millones de hectáreas con potencial. Retrieved June 26, 2024, from <https://www.larepublica.co/economia/del-34-del-area-potencial-para-cultivar-en-colombia-se-aprovecha-cerca-del-13-5-3391297#:~:text=Colombia%20cuenta%20con%20una%20extensi%C3%B3n,13%2C5%25%20del%20potencial.>

Narcotráfico pesa hasta \$19 billones en el Producto Interno Bruto de Colombia. Retrieved June 26, 2024, from <https://www.larepublica.co/economia/narcotrafico-pesa-hasta-19-billones-en-el-producto-interno-bruto-de-colombia-2933774>

García, A.P; Yepes, A.P; Rodríguez, M.; Leguía, D.; Ome, E.; Reyes, L. Informe Final “Logros, Aprendizajes y Retos”. Programa ONU-REDD Colombia. Bogotá D.C. 2018

DANE 2024. Producto Interno Bruto Trimestral (CT) desde el enfoque de la producción a precios corrientes. DANE - PIB Información técnica. (n.d.). Retrieved June 26, 2024, from <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-nacionales-trimestrales/pib-informacion-tecnica>

Atmadja, S.; Komalasari, M.; Alusiola, R.; Barboza, I.; Sartika; L.; Theresia, V.; Simonet; G. 2023. The International Database on REDD+ projects and programs Linking Economics, Carbon and Communities (ID-RECCO) - Project tables, V.5.0

IPCC. (2018). Global warming of 1.5°C. In *Ipcc - Sr15* (Vol. 2, Issue October).

Alarcón Conde, M. Á., & Rodríguez, J. F. Á. (2020). El Balance Social y las relaciones entre los Objetivos de Desarrollo Sostenible y los Principios Cooperativos mediante un Análisis de Redes Sociales. *CIRIEC-España, Revista de Economía Pública, Social y Cooperativa*, 99. <https://doi.org/10.7203/ciriec-e.99.14322>

Szreter, S., & Woolcock, M. (2004). Health by association? Social capital, social theory, and the political economy of public health. In *International Journal of Epidemiology* (Vol. 33, Issue 4). <https://doi.org/10.1093/ije/dyh013>

Ostrom, E. (2015). *Governing the commons: The evolution of institutions for collective action*. In *Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781316423936>

Auld, G., Bernstein, S., & Cashore, B. (2008). The new corporate social responsibility. *Annual Review of Environment and Resources*, 33. <https://doi.org/10.1146/annurev.environ.32.053006.141106>

Hong, H., & Shore, E. (2023). Corporate Social Responsibility. In *Annual Review of Financial Economics* (Vol. 15, pp. 327–350). Annual Reviews Inc. <https://doi.org/10.1146/annurev-financial-111021-094347>

Aguinis, H., & Glavas, A. (2012). What We Know and Don't Know About Corporate Social Responsibility: A Review and Research Agenda. *Journal of Management*, 38(4). <https://doi.org/10.1177/0149206311436079>

Capítulo 7 Discusión, conclusiones y recomendaciones

Según lo presentado se hace la referencia a la discusión, las conclusiones y las recomendaciones del documento de disertación doctoral.

Discusión

Se dispone a consideración de la comunidad académica y los practicantes del mercado la postulación del modelo de precios para el carbono buscando la integración de los elementos sociales y el uso del suelo rural como parte de las estrategias de inversión sostenible ESG (ambientales, sociales y gobernanza por sus siglas en inglés) de los **Capítulos 2, 4 y 6**.

Asimismo, bajo la construcción del capital social, el sector privado, público y solidario podría propender por la activa participación de las comunidades en el territorio impulsando las iniciativas ambientales. De este modo se lograría la evaluación práctica de las proyecciones y los estimados obtenidos en la formulación teórica expuesta para su validación *in situ*; con lo anterior es propuesto que el mercado incentive la certificación del almacenaje y la absorción de los gases de efecto invernadero, bajo el objetivo de la contribución significativa a las mejoras en balance del carbono en base a la capacidad de los suelos y en conjunto con los océanos lograr disminuir las incidencias de las concentraciones de CO_{2e} en la atmosfera, como fuese observado en el **Capítulo 5**.

Luego las agencias certificadoras de carbono podrían profundizar en la integración de las metodologías bajo los preceptos de las tasas de absorción y las capacidades de almacenamiento de los gases de efecto invernadero; en particular los relacionados a la administración forestal conforme a la limitación a la deforestación y los procesos de restauración de los bosques, como objetivo general del modelo propuesto en el **Capítulo 5**. Lugar donde se podría dar un avance hacia la estandarización de los mercados y su eventual consolidación.

Finalizando con la proposición por favorecer los mercados de carbono respecto a la transparencia y consolidación de resultados, para potencializar la liquidez y las posturas de posición de compra y venta con un alcance mayor al exclusivamente regional o local.

Conclusiones

- ❖ El capital social se ha configurado como un elemento esencial para el desarrollo de las iniciativas ambientales, específicamente las que requieran el involucramiento de las comunidades en los

territorios colectivos (**Capítulo 2**). En donde la base por construir es la prevención como un elemento superior al manejo de las crisis y los modelos de la economía social y solidaria podrían contribuir a la gestión colectiva de los recursos de uso común de las comunidades. Sobre la base de las redes sociales, la confianza y la cooperación se facilitaría la resiliencia comunitaria respecto a los impactos climáticos, en concordancia con los objetivos del desarrollo sostenible.

- ❖ Los mercados de carbono contribuyen a los objetivos de mayor alcance a los explícitamente ambientales, como podrían ser los sociales y los financieros (**Capítulos 2, 4, 5 y 6**). En donde el aporte en función de la inclusión de las comunidades y el retorno a la inversión en los suelos podrían favorecer la consolidación de los mercados de carbono basados en la transparencia y la liquidez, como elementos fundacionales hacia una escala superior de ejercicio.
- ❖ Es posible establecer planes de compensación a las emisiones fundadas en las soluciones climáticas de la naturaleza para un plazo inferior al año 2100 (**Capítulo 4**). Conforme a los escenarios propuestos ha sido posible vislumbrar la capacidad de las estrategias forestales, sin embargo, es importante anotar que es requerida la conjunción de las políticas sobre las emisiones y el manejo forestal a una escala global, donde exista el común acuerdo sobre la taxonomía y la operatividad de los instrumentos.
- ❖ Las extensiones requeridas para alcanzar el rango de almacenamiento de CO₂e de 320 Gigatonnes se encuentra a partir de las 700 millones de hectáreas (**Capítulo 4**). Como fue observado en los objetivos de absorción y almacenamiento requeridos en la escala de las coberturas, lo que implicaría el desarrollo de las políticas de mayor profundidad y la aceleración en la búsqueda del cumplimiento de la agenda de la sostenibilidad.
- ❖ El modelo de precios del carbono CO₂e en función de las variables de la tasa de absorción y la capacidad de almacenamiento de las soluciones climáticas de la naturaleza $O_k = P_{CO_2e} (S_{CO_2e} + \Delta CO_2e)$ considera (**Capítulo 5**):
 - Las variables ambientales de mayor uso en la literatura científica conforme a la escala de la problemática del cambio climático.
 - Los precios eficientes por debajo de los \$100 dólares.
 - Los costos totales de compensación por debajo del 1% del PIB global de 2023 (\$1,000,000,000,000 de dólares).
 - Modelaje de los precios en función de los costos de oportunidad del suelo valorados en los periodos de certificación del carbono.

- Los precios dinámicos en función de la madurez de los bosques y contempla la combinación entre el volumen de los certificados y los precios. Favoreciendo la estandarización de curvas para el entendimiento y toma de decisión en los mercados públicos de valores.
- ❖ Las iniciativas ambientales bajo los contextos de las acciones colectivas, los territorios colectivos y las comunidades de los bosques, podrían considerar las metodologías desarrolladas por Elinor Ostrom en su libro *Governing the Commons*, entre otras, como parte de su propuesta de diseño organizacional (**Capítulo 6**).

Recomendaciones

Es importante destacar que la disertación abre caminos de exploración sobre las áreas ambientales, financieras y la sostenibilidad. A continuación, han sido descritos los que durante el desarrollo del doctorado se identificaron por ser los de mayor relevancia conforme a la discusión de los resultados:

- La profundización en la formulación y la estandarización de los conceptos ambientales y financieros para los elementos de juicio en los mercados del carbono.
- La Integración de los objetivos de la sostenibilidad ambiental global bajo un entendimiento amplio y práctico de la ciencia, facilitando los propósitos de los mercados financieros.
- Profundización del estudio de la incidencia social de las iniciativas ambientales y su repercusión en las comunidades gestoras y las poblaciones objetivo de los proyectos.
- Establecimiento de las políticas del uso del suelo conforme a las dimensiones ambientales, financieras y sociales, buscando la maximización de los beneficios y la optimización de los recursos.
- Empleo de los avances tecnológicos como factor catalizador de la aceleración y el monitoreo de las estrategias de la administración del cambio climático.

A continuación, se hacen recomendaciones particulares al nivel local en Colombia conforme la experiencia *in situ* del **Capítulo 6** las cuales podrían contribuir a las experiencias de otras regiones.

Los proyectos de las soluciones climáticas de la naturaleza han demostrado ser esenciales en la generación de empleo en la ruralidad como un factor adicional al restablecimiento de las funciones de los ecosistemas. Por ejemplo, para el caso de Colombia se han perdido por lo menos 8 millones de hectáreas de las extensiones de bosque, lo que en principio representaría una solución para las tres millones de hectáreas afectadas por la erosión severa y con ello canalizar la empleabilidad de 500,000 personas en las áreas rurales.

De este modo se podrían contrarrestar los ciclos de emigración interna de la población desde la ruralidad hacia los centros urbanos estimada en cerca de 6 millones de personas, lo que a su vez ha incrementado los riesgos de vulnerabilidad a la pobreza extrema, al no poder encontrar las condiciones adecuadas para su subsistencia. Adicional a la emigración de colombianos al exterior, que en el año 2022 superó las 500,000 personas, siendo la evidencia de las dificultades que ha tenido el país por ofrecer alternativas para el desarrollo económico y social de sus habitantes.

Bajo el anterior contexto, se hace la propuesta por impulsar los proyectos de las soluciones climáticas de la naturaleza bajo tres alternativas que podrían ser independientes o complementarias, dirigidas a través de los sectores público, privado y/o la economía solidaria.

- I. Financiación a través de una tasa preferencial del endeudamiento público que se estima en un acumulado de \$180,000 millones de dólares o 64% del PIB (similar a la estructuración de los bonos verdes), así el Estado podría promover proyectos de las soluciones climáticas de la naturaleza que requieren inversiones de por lo menos \$500 millones de dólares anuales (es decir el 0.3% del endeudamiento).
- II. Formular la plataforma de acceso transparente a los mercados de carbono internacionales para la financiación de los proyectos de las soluciones climáticas de la naturaleza a través de los estándares en la tasa de absorción y la capacidad de almacenamiento de los gases de efecto invernadero.
- III. Hacer uso de los recursos obtenidos a través del impuesto al carbono para la financiación de los proyectos de restauración ecológica bajo esquemas transparentes y de alta eficacia en la medición de los resultados, sobre la base de la generación del empleo rural.

IV. Anticipar los procesos de crecimiento de los mercados de carbono que a su vez podrían verse favorecidos en el mediano plazo con la incorporación de los mercados de la biodiversidad y la sostenibilidad, donde la experiencia reciente podría impulsar la estandarización y facilitar el acceso a las herramientas para las poblaciones de mayor exposición a los riesgos climáticos, así como aquellas que podrían liderar las iniciativas ambientales a un nivel superior en la escala de los objetivos globales.

Referencias bibliográficas

- Adger, W. N. (2003). Social capital, collective action, and adaptation to climate change. *Economic Geography*, 79(4). <https://doi.org/10.1111/j.1944-8287.2003.tb00220.x>
- Adger, W. N., Brown, I., & Surminski, S. (2018). Advances in risk assessment for climate change adaptation policy. In *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* (Vol. 376, Issue 2121). <https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0106>
- Alarcón Conde, M. Á., & Rodríguez, J. F. Á. (2020). El Balance Social y las relaciones entre los Objetivos de Desarrollo Sostenible y los Principios Cooperativos mediante un Análisis de Redes Sociales. *CIRIEC-España, Revista de Economía Pública, Social y Cooperativa*, 99. <https://doi.org/10.7203/ciriec-e.99.14322>
- Armenteras, D., González, TM., Meza, M., Ramírez-Delgado, J.P., Cabrera, E., Galindo, G., Yepes, A. (Eds). 2018. Causas de Degradación Forestal en Colombia: una primera aproximación. Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia-IDEAM, Programa ONU-REDD. Bogotá D.C., Colombia., 105 pág.
- Andrew, R. M. P. G. P. (2021). The Global Carbon Project's fossil CO2 emissions. *Our World in Data*.
- Baranzini, A., van den Bergh, J. C. J. M., Carattini, S., Howarth, R. B., Padilla, E., & Roca, J. (2017). Carbon pricing in climate policy: seven reasons, complementary instruments, and political economy considerations. In *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* (Vol. 8, Issue 4). <https://doi.org/10.1002/wcc.462>
- Bernal, B., Murray, L. T., & Pearson, T. R. H. (2018). Global carbon dioxide removal rates from forest landscape restoration activities. *Carbon Balance and Management*, 13(1). <https://dsepulvoi.org/10.1186/s13021-018-0110-8>
- Bob, U., & Bronkhorst, S. (2011). Environmental conflicts: Key issues and management implications. *African Journal on Conflict Resolution*. <https://doi.org/10.4314/ajcr.v10i2.63307>
- Boston Consulting Group. Global Wealth Report 2021.
- Brancalion, P. H. S., de Siqueira, L. P., Amazonas, N. T., Rizek, M. B., Mendes, A. F., Santiami, E. L., Rodrigues, R. R., Calmon, M., Benini, R., Tymus, J. R. C., Holl, K. D., & Chaves, R. B. (2022). Ecosystem restoration job creation potential in Brazil. *People and Nature*, 4(6). <https://doi.org/10.1002/pan3.10370>
- Brundtland, G. (1987). Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. *Oxford Paperbacks, Report of*.
- BP Statistical Review of World Energy; Shift Project; Maddison Project Database; UN Population Prospects
- Chenet, H., Ryan-Collins, J., & van Lerven, F. (2021). Finance, climate-change and radical uncertainty: Towards a precautionary approach to financial policy. *Ecological Economics*, 183. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.106957>
- Choudhury, B. (2020). Climate Change as Systemic Risk. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3704962>

- Corbett, D. C., & Rostow, W. W. (1960). The Stages of Economic Growth: A Non-Communist Manifesto. *International Journal*. <https://doi.org/10.2307/40198523>
- Carbon Pricing Leadership Coalition. CPLC. Report of the High-Level Commission on Carbon Prices. CPLC 2017
- CONPES 4021 Política nacional para el control de la deforestación y la Gestión sostenible de los bosques (DNP, 2020).
- Dale, V. H., Joyce, L. A., McNulty, S., & Neilson, R. P. (2000). The interplay between climate change, forests, and disturbances. *Science of the Total Environment*, 262(3). [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00522-2](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00522-2)
- Dlugolecki, A. (2008). Climate change and the insurance sector. *Geneva Papers on Risk and Insurance: Issues and Practice*, 33(1), 71–90. <https://doi.org/10.1057/palgrave.gpp.2510152>
- Dlugolecki, A. F. (1992). Insurance Implications of Climatic Change. *The Geneva Papers on Risk and Insurance - Issues and Practice*, 17(3). <https://doi.org/10.1057/gpp.1992.30>
- Dulal, H., Brodnig, G., Onoriose, C., & Thakur, H. (2010). Capitalising on assets: vulnerability and adaptation to climate change in Nepal. The World Bank social development papers No 121. The World Bank, Washington. Social Development Working Papers: Social Dimensions of Climate Change, 121.
- Engström, G., Gars, J., Krishnamurthy, C., Spiro, D., Calel, R., Lindahl, T., & Narayanan, B. (2020). Carbon pricing and planetary boundaries. *Nature Communications*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18342-7>
- Ellis, F., & Biggs, S. (2001). Evolving themes in rural development 1950s-2000s. *Development Policy Review*. <https://doi.org/10.1111/1467-7679.00143>
- Escobar, A. (2020). Sentipensar with the Earth . In *Pluriversal Politics*. <https://doi.org/10.1215/9781478012108-005>
- Etter A., Andrade A., Saavedra K., Amaya P. y P. Arévalo. Estado de los Ecosistemas Colombianos: una aplicación de la metodología de la Lista Roja de Ecosistemas (Vers2.0) 2017.
- FAO and UNEP. (2020). The state of the World ' S Forests. *Forests, Biodiversity and People*.
- FAO, & UNEP. (2020). The state of world's Forests 2020. *Forests, biodiversity and people*. In *Geographical Review* (Vol. 14, Issue 1).
- FAO. (2005). State of the World's forests 2005. *Management*, 29(4).
- FAO state of the world's forests. (2004). In *Forestry Chronicle* (Vol. 80, Issue 2, p. 198).
- FAO, & OECD. (2019). Background Notes on Sustainable, Productive and Resilient Agro-Food Systems: Value chains, human capital, and the 2030 Agenda. In *A Report to the G20 Agriculture Deputies July 2019* (Issue July).
- Flannigan, M. D., Stocks, B. J., & Wotton, B. M. (2000). Climate change and forest fires. *Science of the Total Environment*, 262(3). [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00524-6](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00524-6)
- Fletcher, A. J., Akwen, N. S., Hurlbert, M., & Diaz, H. P. (2020). "You relied on God and your neighbour to get through it": social capital and climate change adaptation in the rural Canadian Prairies.

- Regional Environmental Change, 20(2). <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01645-2>
- Friedlingstein, P., O’Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Bakker, D. C. E., Hauck, J., Landschützer, P., Le Quéré, C., Luijkx, I. T., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshackl, C., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Anthoni, P., ... Zheng, B. (2023). Global Carbon Budget 2023. *Earth System Science Data*, 15(12), 5301–5369. <https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023>
- Friedlingstein, P., O’Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Hauck, J., Olsen, A., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, S., Le Quéré, C., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S., Aragão, L. E. O. C., Arneeth, A., Arora, V., Bates, N. R., ... Zaehle, S. (2020). Global Carbon Budget 2020. *Earth System Science Data*, 12(4). <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>
- Galtung, J. (1990). Cultural Violence. *Journal of Peace Research*. <https://doi.org/10.1177/0022343390027003005>
- García, A.P; Yepes, A.P; Rodríguez, M.; Leguía, D.; Ome, E.; Reyes, L. Informe Final “Logros, Aprendizajes y Retos”. Programa ONU-REDD Colombia. Bogotá D.C. 2018
- Gaytán Cortés, J. (2023). Break-even point. *Mercados y Negocios*, 48. <https://doi.org/10.32870/myn.vi48.7690>
- Goswami, R., Bedia, S., & Pandit, N. (2020). Restoring Employment and Rural Landscapes Can Ecological Restoration Usher Rural Economic Revival in the ‘Post-pandemic’ Period? In *Economic and Political Weekly* (Vol. 55, Issue 49).
- Griggs, D., Stafford-Smith, M., Gaffney, O., Rockström, J., Öhman, M. C., Shyamsundar, P., Steffen, W., Glaser, G., Kanie, N., & Noble, I. (2013). Policy: Sustainable development goals for people and planet. In *Nature* (Vol. 495, Issue 7441). <https://doi.org/10.1038/495305a>
- Griscom, B. W., Adams, J., Ellis, P. W., Houghton, R. A., Lomax, G., Miteva, D. A., Schlesinger, W. H., Shoch, D., Siikamäki, J. V., Smith, P., Woodbury, P., Zganjar, C., Blackman, A., Campari, J., Conant, R. T., Delgado, C., Elias, P., Gopalakrishna, T., Hamsik, M. R., ... Fargione, J. (2017). Natural climate solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(44). <https://doi.org/10.1073/pnas.1710465114>
- Harvey, H., Orvis, R., & Rissman, J. (2018). Designing Climate Solutions: A Policy Guide for Low-Carbon Energy. In *Designing Climate Solutions*.
- Hernández-Sampieri, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2016). Metodología de la investigación. 6ta Edición Sampieri. *Guía Para Realizar Investigaciones Sociales*. Plaza y Valdés.
- Homer-Dixon, T. F. (1991). On the Threshold: Environmental Changes as Causes of Acute Conflict. *International Security*. <https://doi.org/10.2307/2539061>
- Humphreys, M. (2005). Natural resources, conflict, and conflict resolution: Uncovering the mechanisms. In *Journal of Conflict Resolution*. <https://doi.org/10.1177/0022002705277545>
- Iansiti, M., & Levien, R. (2004). Strategy as Ecology. In *Harvard Business Review* (Vol. 82, Issue 3).
- (IDEAM, 2021) Olarte Villanueva, C. P., Merchán López, O. F., Linares Prieto, R., Quintero Cardozo, F., León Cruz, R., Rodríguez León, A., Montealegre J. O. (2021). Marco rector para la implementación del Inventario Forestal Nacional. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios

- Ambientales (Ideam). 226 pp.
- IPCC. (2018). Global warming of 1.5°C. In *Ipcc - Sr15* (Vol. 2, Issue October).
- Janetos, A. C., Watson, R. T., Zinyowera, M. C., & Moss, R. H. (1997). Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses. *Ecology*, 78(8). <https://doi.org/10.2307/2265930>
- Karol, J., & Gale, T. (2004). *What is 'environmental capital'? Bourdieu's social theory and sustainability*.
- Kay, C. (2001). Los paradigmas del desarrollo rural en América Latina. *Institute of Social Studies*.
- Keith, D. W., Holmes, G., St. Angelo, D., & Heidel, K. (2018). A Process for Capturing CO2 from the Atmosphere. *Joule*, 2(8). <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.05.006>
- Kim, H., Matthes, C., & Phan, T. (2021). Extreme Weather and the Macroeconomy. Federal Reserve Bank of Richmond Working Papers, 21, 1–31. <https://doi.org/10.21144/wp21-14>
- Lo, A. Y., Liu, S., Cheung, L. T. O., & Chan, F. K. S. (2020). Contested Transformations: Sustainable Economic Development and Capacity for Adapting to Climate Change. *Annals of the American Association of Geographers*, 110(1). <https://doi.org/10.1080/24694452.2019.1625748>
- LI, H. M., WANG, X. C., ZHAO, X. F., & QI, Y. (2021). Understanding systemic risk induced by climate change. *Advances in Climate Change Research*, 12(3). <https://doi.org/10.1016/j.accre.2021.05.006>
- Putting carbon markets to work on the path to net zero | McKinsey. (n.d.). Retrieved April 19, 2024, from <https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/putting-carbon-markets-to-work-on-the-path-to-net-zero#/>
- Martínez, M. L., Intralawan, A., Vázquez, G., Pérez-Maqueo, O., Sutton, P., & Landgrave, R. (2007). The coasts of our world: Ecological, economic and social importance. *Ecological Economics*, 63(2–3). <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.10.022>
- Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L., Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. W., & O. Yelekçi, R. Y. and B. Z. (eds. . (2021). IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Metcalf, G. E. (2023). Five myths about carbon pricing. *Oxford Review of Economic Policy*, 39(4). <https://doi.org/10.1093/oxrep/grad042>
- Mo, L., Zohner, C. M., Reich, P. B., Liang, J., de Miguel, S., Nabuurs, G.-J., Renner, S. S., van den Hoogen, J., Araza, A., Herold, M., Mirzaghali, L., Ma, H., Averill, C., Phillips, O. L., Gamarra, J. G. P., Hordijk, I., Routh, D., Abegg, M., Adou Yao, Y. C., ... Crowther, T. W. (2023). Integrated global assessment of the natural forest carbon potential. *Nature*, 624(7990), 92–101. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06723-z>
- Monasterolo, I. (2020). Climate change and the financial system. In *Annual Review of Resource Economics* (Vol. 12). <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-110119-031134>
- Morice, C. P., Kennedy, J. J., Rayner, N. A., Winn, J. P., Hogan, E., Killick, R. E., Dunn, R. J. H., Osborn, T. J., Jones, P. D., & Simpson, I. R. (2021). An Updated Assessment of Near-Surface Temperature Change From 1850: The HadCRUT5 Data Set. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(3).

<https://doi.org/10.1029/2019JD032361>

- Narassimhan, E., Gallagher, K. S., Koester, S., & Alejo, J. R. (2018). Carbon pricing in practice: a review of existing emissions trading systems. *Climate Policy*, 18(8).
<https://doi.org/10.1080/14693062.2018.1467827>
- Orsagh, M., Preece, R., & Baker, G. (2020). Climate Change Analysis in the Investment Process. CFA Institute.
- Ostrom, E. (2015). Governing the commons: The evolution of institutions for collective action. In *Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action*.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781316423936>
- Ostrom, E. (2009). A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. In *Science* (Vol. 325, Issue 5939). <https://doi.org/10.1126/science.1172133>
- Pan, Y., Birdsey, R. A., Phillips, O. L., & Jackson, R. B. (2013). The structure, distribution, and biomass of the world's forests. In *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* (Vol. 44).
<https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110512-135914>
- Parry, I. (2019). Putting a price on pollution. In *Finance and Development* (Vol. 56, Issue 4).
- Pelling, M., & High, C. (2005). Understanding adaptation: What can social capital offer assessments of adaptive capacity? *Global Environmental Change*, 15(4).
<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2005.02.001>
- Petzold, J. (2016). Limitations and opportunities of social capital for adaptation to climate change: A case study on the Isles of Scilly. *Geographical Journal*, 182(2). <https://doi.org/10.1111/geoj.12154>
- Pitas, N., & Ehmer, C. (2020). Social Capital in the Response to COVID-19. *American Journal of Health Promotion*, 34(8). <https://doi.org/10.1177/0890117120924531>
- Porter, M. E. (1991). America's green strategy. *Scientific American*, 264(4).
- Putnam, R. D. (1995). Tuning In, Tuning Out: The Strange Disappearance of Social Capital in America. *PS: Political Science and Politics*, 28(4). <https://doi.org/10.2307/420517>
- Rafatya, R., Dolphin, G., & Pretis, F. (2020). Carbon Pricing and the Elasticity of CO2 Emissions. Institute for New Economic Thinking Working Paper Series. <https://doi.org/10.36687/inetwp140>
- Ratner, B. D., Meinzen-Dick, R., May, C., & Haglund, E. (2013). Resource conflict, collective action, and resilience: An analytical framework. *International Journal of the Commons*, 7(1).
<https://doi.org/10.18352/ijc.276>
- Rosenbloom, D., Markard, J., Geels, F. W., & Fuenfschilling, L. (2020). Why carbon pricing is not sufficient to mitigate climate change—and how “sustainability transition policy” can help. In *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* (Vol. 117, Issue 16).
<https://doi.org/10.1073/pnas.2004093117>
- Saatchi, S. S., Harris, N. L., Brown, S., Lefsky, M., Mitchard, E. T. A., Salas, W., Zutta, B. R., Buermann, W., Lewis, S. L., Hagen, S., Petrova, S., White, L., Silman, M., & Morel, A. (2011). Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(24).
<https://doi.org/10.1073/pnas.1019576108>

- Saavedra, C., Budd, W. W., & Lovrich, N. P. (2012). Assessing Resilience to Climate Change in US Cities. *Urban Studies Research*, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/458172>
- Sepúlveda, Sergio, Echeverri Rafael Rodríguez Adrián, y Melania Portilla. (2005). El enfoque territorial del desarrollo rural: retos para la reducción de la pobreza. Documento presentado en el seminario Reducción de la pobreza rural en Centroamérica: fortalecimiento de servicios técnicos, empresariales y financieros, CATIE, Turrialba, Costa Rica, 11-13 abril.
- Smiley, K. T. (2020). Social Capital and Industrial Air Pollution in Metropolitan America. *Sociological Quarterly*, 61(4). <https://doi.org/10.1080/00380253.2019.1711252>
- Sohnngen, B., Alig, R. J., & Solberg, B. (2010). Chapter 2: The forest sector, climate change, and the global carbon cycle-environmental and economic implications. USDA Forest Service - General Technical Report PNW-GTR, 833.
- State and Trends of Carbon Pricing 2019. (2019). In *State and Trends of Carbon Pricing 2019*. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1435-8>
- Stern, Nicholas, Stiglitz, J. E., Duan, M., Edenhofer, O., Giraud, G., Heal, G., Lebre la Rovere, E., Morris, A., Moyer, E., Pangestu, M., Shukla, P. R., Sokona, Y., & Winkler, H. (2017). High-Level Commission on Carbon Prices. *World Bank*.
- Stern, Nicolas. (2006). STERN REVIEW: The Economics of Climate Change Executive Summary. *October*, 30(3).
- Stoddard, I., Anderson, K., Capstick, S., Carton, W., Depledge, J., Facer, K., Gough, C., Hache, F., Hoolohan, C., Hultman, M., Hällström, N., Kartha, S., Klinsky, S., Kuchler, M., Lövbrand, E., Nasiritousi, N., Newell, P., Peters, G. P., Sokona, Y., ... Williams, M. (2021). Three Decades of Climate Mitigation: Why Haven't We Bent the Global Emissions Curve? In *Annual Review of Environment and Resources* (Vol. 46). <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012220-011104>
- Sturrock, R. N., Frankel, S. J., Brown, A. V., Hennon, P. E., Kliejunas, J. T., Lewis, K. J., Worrall, J. J., & Woods, A. J. (2011). Climate change and forest diseases. In *Plant Pathology* (Vol. 60, Issue 1). <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2010.02406.x>
- Szreter, S., & Woolcock, M. (2004). Health by association? Social capital, social theory, and the political economy of public health. In *International Journal of Epidemiology* (Vol. 33, Issue 4). <https://doi.org/10.1093/ije/dyh013>
- SIFMA INSIGHTS, 2021. Global Equity Markets Primer
- Tietenberg, T. (2012). Carbon Pricing: Lessons Derived from Experience* CHAPTER 8. In *Fiscal Policy to Mitigate Climate Change A Guide for Policymakers*.
- UNEP-KPMG Desmytifying private climate finance. United Nation Environment Programme 2016.
- UNEP The State of Sustainable Finance in the United States. United Nation Environment Programme 2014.
- Watson, R. T., Heywood, V. H., Baste, T., Dias, B., Gámez, R., Janetos, T., Reid, W., & Ruark, G. (1995). *Global biodiversity assessment :summary for policy-makers /*. Cambridge University Press, published for UNEP, PP - Cambridge, [England] ; PP - New York :
- Waygood, S., A Roadmap For Sustainable Capital Markets: How Can the UN Sustainable Development

Goals harness the global capital Markets? Aviva 2015.

- Whitmee, S., Haines, A., Beyrer, C., Boltz, F., Capon, A. G., De Souza Dias, B. F., Ezeh, A., Frumkin, H., Gong, P., Head, P., Horton, R., Mace, G. M., Marten, R., Myers, S. S., Nishtar, S., Osofsky, S. A., Pattanayak, S. K., Pongsiri, M. J., Romanelli, C., ... Yach, D. (2015). Safeguarding human health in the Anthropocene epoch: Report of the Rockefeller Foundation-Lancet Commission on planetary health. In *The Lancet* (Vol. 386, Issue 10007). [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(15\)60901-1](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(15)60901-1)
- Wolf, J., Adger, W. N., Lorenzoni, I., Abrahamson, V., & Raine, R. (2010). Social capital, individual responses to heat waves and climate change adaptation: An empirical study of two UK cities. *Global Environmental Change*, 20(1). <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2009.09.004>
- Wu, X., Bai, X., Qi, H., Lu, L., Yang, M., & Taghizadeh-Hesary, F. (2023). The impact of climate change on banking systemic risk. *Economic Analysis and Policy*, 78. <https://doi.org/10.1016/j.eap.2023.03.012>
- Xu, L., Saatchi, S. S., Yang, Y., Yu, Y., Pongratz, J., Anthony Bloom, A., Bowman, K., Worden, J., Liu, J., Yin, Y., Domke, G., McRoberts, R. E., Woodall, C., Nabuurs, G. J., De-Miguel, S., Keller, M., Harris, N., Maxwell, S., & Schimel, D. (2021). Changes in global terrestrial live biomass over the 21st century. *Science Advances*, 7(27). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abe9829>

Anexo 1: El rol potencial del Capital Social en la adaptación al cambio climático a través de las soluciones basadas en la naturaleza

Mesa: mercados, finanzas y autonomía de las economías solidarias

Pontificia Universidad Javeriana

Doctorado en estudios ambientales y rurales

Casas-Cuestas, Michel

michel-casas@javeriana.edu.co

“El desafío urgente de proteger nuestra casa común incluye la preocupación de unir a toda la familia humana en la búsqueda de un desarrollo sostenible e integral, pues sabemos que las cosas pueden cambiar.” Carta Encíclica Laudato Si’ Del Santo Padre Francisco Sobre El Cuidado De La Casa Común, 2015.

Palabras Clave

Capital social, cambio climático, soluciones climáticas basadas en la naturaleza y marginalización.

Resumen

El cambio climático requiere la acción global, sin embargo, el *cómo* realizarlo es uno de los mayores retos que enfrenta la humanidad. Por ello se ha planteado desde el Panel Intergubernamental del Cambio Climático -IPCC- la perspectiva desde el capital social para una respuesta institucional, coordinada y multi esalar.

Conforme a los antecedentes del cambio climático por su alto costo económico, así como sus efectos sociales y ambientales a gran escala, el presente documento tiene como objetivo brindar elementos teóricos y evidencias empíricas, como insumo al diseño de una política sectorial.

Introducción

El cambio climático es la realidad del siglo XXI siendo uno de los principales retos para la humanidad. Por ello se hace necesaria la proposición de las soluciones integrales y sistemáticas que procuren la sostenibilidad de las sociedades, siendo el rol apto para el Capital Social.

Según el IPCC, en las transiciones de los ecosistemas se destacan las necesidades de abordar los elementos del capital social en la adaptación de las comunidades al cambio climático. Asimismo, en el fortalecimiento de las capacidades institucionales sobre las instituciones cooperativas y las redes sociales de seguridad, se evidencia la necesidad por desarrollar el capital social para lograr la efectividad en el manejo de las crisis climáticas a nivel local, regional y nacional. Lo anterior en razón a las necesidades de una transformación en un contexto con limitada evidencia de cómo lograrlo a nivel sistémico (IPCC, 2018).

Las anomalías en la temperatura han correspondido a un aumento en la tendencia de 0.8°C para el periodo comprendido entre 1980 y 2020, con una mayor incidencia sobre el hemisferio norte (Met Office Hadley Centre, 2020) y con un aumento de 10 centímetros en el nivel del mar (CNES, LEGOS, CLS 2019). En consecuencia, se ha observado el aumento en la frecuencia de los eventos relacionados a la velocidad de los vientos y los fenómenos meteorológicos, alterando la vida sobre la tierra a causa de las necesidades humanas, específicamente por la generación de energía para el desarrollo, ocasionando la contaminación de la atmosfera y los océanos, disminuyendo el potencial de la biodiversidad.

Incluso los efectos llegan a la contabilización de las pérdidas para las compañías aseguradoras en los Estados Unidos por efectos del cambio climático, que en 2017 se estimaron en aproximadamente \$300 mil millones de dólares, es decir el tamaño de la economía colombiana durante un año. Ante dichos riesgos por la incertidumbre generada respecto al capital ambiental y financiero, se hace necesaria la propuesta desde el capital social como un elemento hacia la resiliencia y en lo posible facilitar la adaptación de las poblaciones al cambio climático 2017 (*2017 U.S. Billion-Dollar Weather and Climate Disasters: A Historic Year in Context* / NOAA Climate.Gov, n.d.).

De este modo el capital social podría profundizar su actividad proveyendo la sostenibilidad necesaria al modelo de desarrollo cuando se presentan fallas y son marginalizadas las comunidades. Igualmente se podría participar en el desarrollo de los instrumentos financieros especializados en la protección, la conservación y la restauración de la naturaleza.

Pregunta de investigación

¿El capital social podría tener algún papel dentro del manejo de la situación del cambio climático?

Metodología

El presente documento buscara encontrar las evidencias teóricas y empíricas sobre el rol del capital social en relación con el cambio climático, para luego encontrar las fortalezas que pudiera tener en la profundización de su actividad en el contexto regional teniendo como referente la diferenciación intersubjetiva respecto a las organizaciones de otra naturaleza.

Objetivo General

Ofrecer el panorama sobre la actividad del Capital Social en relación con la adaptación al cambio climático sirviendo de insumo para la formulación de la política sectorial local.

Marco Teórico

Capital Social y el cambio climático

El capital social entendido como las conexiones entre las personas a través de las redes sociales basadas en las normas y la confianza, facilitan la respuesta colectiva a los objetivos comunes (Putnam, 1995), demostrando *ser* esencial en el desempeño de la adaptación al cambio climático por su capacidad de natural hacia la resiliencia (Saavedra et al., 2012). Luego su caracterización complementaria dentro de las sociedades le permite fomentar los factores que podrían favorecer su éxito en contravía a los modelos de politización o polarización que frustran reiterativamente la transformación requerida hacia el logro de la sostenibilidad (Keith et al., 2018b)(Lo et al., 2020).

Específicamente para el desarrollo económico basado en el modelo formulado por Walt Whitman Rostow (Corbett & Rostow, 1960) donde se identifican sus etapas: a partir del *statu quo*; luego la explotación de los recursos donde se estancan la mayoría de los países pobres; pasando a la etapa intermedia con la industria manufacturera que favorece la comercialización e industrialización de las sociedades; para el objetivo final de la masificación del consumo de servicios y productos como indicador del bienestar. Empero dicho proceso ha presentado fallas que se esperaban fueran subsanadas por la corrección del largo plazo, en tanto se han profundizado, llegando a ser definidos como las fallas del mercado. Específicamente para el capital social se ha originado la marginalización de las poblaciones en los aspectos culturales, políticos y económicos (Garcia-Velandia, 2019); resultando en los ciclos de la pobreza y la migración a múltiples escalas. Igualmente se han identificado como catalizadores de estas fallas la contaminación, la escasez de los alimentos, la disminución en las oportunidades laborales, las

crisis pensionales, la corrupción, los esquemas débiles de gobernanza y las deficiencias en la protección social, entre otros (Galtung, 1990).

Ahora sobre estos ciclos económicos su función creciente y oscilatoria, va creando el Producto Interno Bruto de los países entendido como el capital generado por el consumo de la población sumando los excedentes o déficits de la actividad comercial con el extranjero. Sin embargo, dichas oscilaciones originan recesiones o estancamientos que son frecuentemente relacionados con las fallas del mercado, contrastando la competitividad que impulsa dicha función hacia su ascenso, donde la expectativa es que esta sea superior a las crisis inducidas como se ha logrado hasta el momento actual; pero dadas sus dimensiones hace que sus efectos sean más sensibles a las poblaciones vulnerables.

Mientras en paralelo, el crecimiento constante de las poblaciones y el aumento de la expectativa de vida, han logrado favorecer la disminución de la mortandad infantil pasando de 214 a 59 por cada mil niños menores de 5 años, para el periodo entre 1955 y 2005, así como la reducción de la pobreza extrema en cerca de 700 millones de personas para los últimos 30 años (Whitmee et al., 2015), siendo los principales flagelos de la humanidad en el siglo XX y anteriores. Adicionando la introducción de cultivos y semillas de alto rendimiento a mediados del siglo XX como fue el caso del trigo y el arroz en México y Filipinas (Kay, C. et. al, 2009), que podrían haber favorecido los crecimientos exponenciales de sus poblaciones de entre 5 y 6 veces en el periodo de 1950 a 2020 (Banco Mundial). Estimulando a su vez el consumo de energía per cápita, donde los países desarrollados mantienen una tasa por encima de los 10,000 KW/h mientras los países en desarrollo se encuentran en alrededor de los 5,000 KW/h (BP-UN), siendo la combustión de fósiles una de las principales fuentes, las cuales son altamente contaminantes encontrándose entre las principales emisoras de los gases de efecto invernadero. Donde los estimados anuales de muertes por polución están en 4.6 millones y el desplazamiento de por lo menos 20 millones de personas por efectos del clima a nivel global (Whitmee et al., 2015).

Ahora conforme al panorama expuesto, los movimientos sociales hacen un llamado sobre la necesidad de un modelo de mayor inclusión (Sepulveda, S. Et al 2005), plural, "*pluriverso*", "*donde todos quepamos*", un mundo mestizo, descentralizado (Escobar, 2020) que permita el dialogo entre las perspectivas buscando la "paz ambiental". Contrastando las perdidas ambientales que tienen un efecto perdurable (Bob & Bronkhorst, 2011)(Watson et al., 1995) y que superan frecuentemente los ciclos generacionales humanos en contravención clara de lo que es un modelo de sostenibilidad, demandando la acción global que es restringida por la reducción de la capacidad del ser humano por intervenir en la degradación ambiental conforme al avance en el tiempo (Homer-Dixon, 1991). Específicamente, los países

en desarrollo están expuestos a una militarización constante alejándose de la conciliación que requieren sus procesos (Humphreys, 2005). Siendo necesario establecer un marco de desarrollo que mitigue los efectos de la marginalidad permitiendo el dialogo entre las perspectivas en favor de las transiciones requeridas; por ejemplo, para el sector rural se mantiene la discusión contemporánea sobre su paradigma (Kay, C. et. al.2001) basado en la agricultura como medio de vida (Ellis & Biggs, 2001). Siendo identificados por la literatura los movimientos sociales como la respuesta colectiva a las falencias por satisfacer sus necesidades básicas requiriendo programas de política pública conforme se agudizan sus problemáticas y en especial las áreas rurales que son el punto de inicio de los ciclos de la pobreza económica.

Sobre el cambio climático, el capital social podría incluir a las organizaciones públicas y privadas basándose en la confianza, la reputación y la acción recíproca, para construir la resiliencia requerida para enfrentar los riesgos. Creando la interdependencia necesaria para generar la capacidad adaptativa del manejo de los recursos, dentro de las normas y las redes que hagan viable la acción colectiva sobre los riesgos de las catástrofes proveyendo marcos de seguridad y sostenibilidad (Adger, 2003). Igualmente la flexibilidad es esencial para los procesos de adaptación para la efectividad en el logro de los objetivos compartidos en tanto se logra superar la marginalización de las poblaciones vulnerables (Pelling & High, 2005). Un ejemplo puede ser el planteado por Kevin Smiley en 2020 quien identificó que las áreas metropolitanas con menor polución presentaban mayores niveles de conectividad social, donde los barrios con mayor riqueza económica aceptaban en menor grado el establecimiento de plantas de tratamiento de residuos peligrosos, así como la desproporción en la baja calidad del aire que afecta a las poblaciones de raza negra e hispana en los Estados Unidos como evidencia de la desigualdad (Smiley, 2020); respaldando la teoría de Putnam sobre el mayor nivel de relacionamiento del capital social como factor esencial para la construcción de la sociedad civil (Putnam, R. 2000) así como la mitigación de las barreras a la adaptación al cambio climático (Wolf et al., 2010).

Recientemente, el capital social creado por la comunicación digital le ha provisto de una herramienta robusta para el manejo de las crisis tal como sucedió con la pandemia del Covid-19 donde se logró mantener el relacionamiento y la conectividad social (Pitas & Ehmer, 2020), exponiendo su relevancia en la gestión de las crisis.

Por último, la agrupación por *clústeres* sugerida por Álvarez & Alarcón entre los *Principios Cooperativos* y los *Objetivos de Desarrollo Sostenible* permite hacer la vinculación directa entre la economía solidaria y cooperativa y el cambio climático; específicamente el *clúster* denominado *transversalidad implícita* donde la empresas pueden potencializar su institucionalismo a través del

cumplimiento del ODS 13 *acción por el clima*, conforme al carácter intrínseco de su actividad (Alarcón Conde & Rodríguez, 2020).

Hallazgos preliminares e insumos de política sobre el capital social

Fortalezas

El conjunto de islas en Sicilia, Reino Unido ha logrado demostrar la relevancia de la capacidad en la acción colectiva y la cohesión para la adaptación al cambio climático buscando el bien común. Donde el capital social promueve el conocimiento local y la autonomía en la gobernanza siendo posible formular programas de atención a los impactos por inundaciones, tormentas y erosión creando el enlace con el personal externo que contribuye con ideas para el desarrollo y la experiencia, permitiendo el entorno ideal para la cooperación. Así las islas pasaron de un modelo de capital social exclusivo para las emergencias a la reiterativa planeación de la resiliencia en la adaptación a los fenómenos climáticos (Petzold, 2016).

En el mismo sentido se ha venido obteniendo resultados favorables respecto a la innovación inducida por ambientes fomentados por el capital social, donde la intensidad en el relacionamiento institucional impulsa las actividades productivas y el conocimiento basado en el trabajo en equipo (Parlar et al., 2020). Explícitamente el IPCC reconoció al capital social como un activo que puede facilitar la adaptación, así como la necesidad por diferenciar la relación inversa entre la vulnerabilidad y la adaptación climática, donde el capital social sirve de facilitador en el paso del primero al segundo, a través de las formas del capital social *per se*: conexiones verticales (*linking*), alianzas horizontales (*bonding*) o creando plataformas (*bridging*) heterogéneas para las organizaciones conforme a su grado de formalización (Szreter & Woolcock, 2004).

Por lo anterior el Capital Social cuenta con la suficiencia requerida para impulsar los programas con objetivo de adaptar a las poblaciones al cambio climático y proveer herramientas útiles dedicados a la mitigación de los riesgos inherentes.

Retos

Conforme a las fortalezas del capital social en relación con el cambio climático es importante anotar algunas advertencias sobre su manejo.

En primera instancia las comunidades rurales observan con escepticismo su desarrollo en tanto se logran resultados preliminares, luego en la medida que la verticalidad y la horizontalidad del capital

social se profundiza es posible mitigar las barreras en favor de la adaptación y evitar la materialización de los riesgos por eventos climáticos u otros (Fletcher et al., 2020).

Igualmente, la alineación de los intereses para la profundización del capital social es uno de los elementos pivote para lograr superar las barreras de los prejuicios y las divisiones sociales que son los generadores de los retrocesos y las tensiones del desarrollo (Fletcher et al., 2020).

Por último, determinar la escala de la acción colectiva será el factor que decida el nivel de compromiso que sea requerido por parte la economía cooperativa y solidaria conforme a las capacidades actuales del sector.

Temporalidad

Conforme la agenda del cambio climático es imperativo formular y anticipar los programas de adaptación y resiliencia en la medida que sus costos ambientales y económicos sean aún mayores, lo anterior bajo los escenarios propuestos para el 2030 y el 2050 por el IPCC en 2021 los cuales exigen la acción global para la estabilización y/o mitigación de las emisiones de los gases de efecto invernadero.

Así sería posible acumular la experiencia y conocimiento que exige la realización de los programas para obtener resultados que permitan ajustar e impulsar las iniciativas que logren ser efectivas en el mediano plazo y evitar la procrastinación global de las últimas décadas respecto a los fenómenos climáticos. Favoreciendo el capital social hacia la adaptación y la resiliencia al cambio climático que puede soportarse sobre el factor de la eficiencia en costos, por ser una iniciativa privada privilegiándole de la inversión pública que es mucho más costosa y con bajo valor agregado, al igual que respecto a la inversión exclusivamente corporativa, posicionándole en un lugar intermedio que puede ser el apropiado para la formulación de programas especializados.

Por lo que sería ideal encontrar el lugar adecuado para la formulación de programas planteados desde el Capital Social dentro del panorama de eficiencia ambiental formulado en la **Matriz 1**.

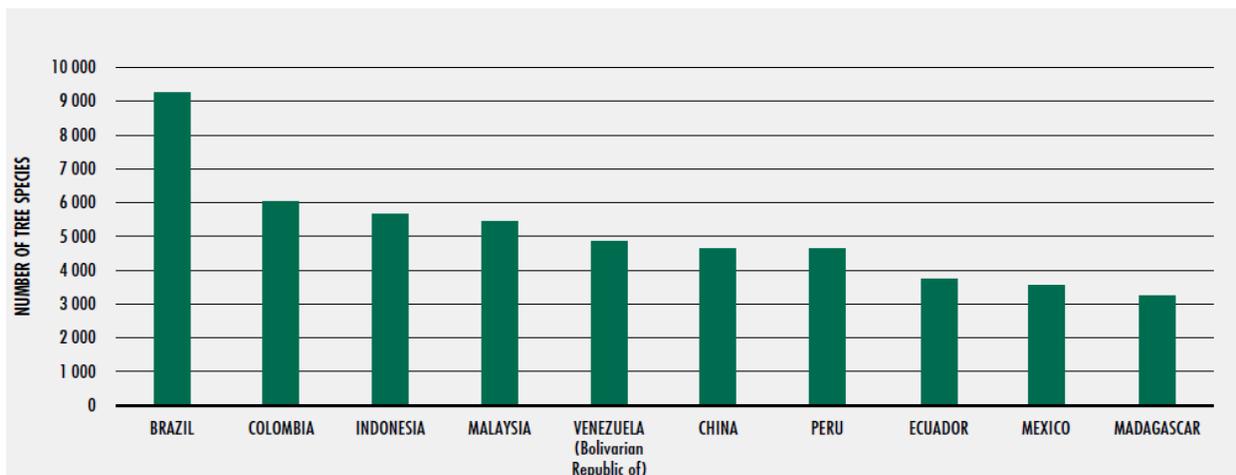
Caso colombiano de la reforestación y la deforestación evitada como soluciones climáticas basadas en la naturaleza

Dimensiones de los Bosques

Colombia es el segundo país con el mayor número de especies de árboles en la Tierra con alrededor de 6,000 como se puede ver en la **Gráfica 1** (FAO,2020).

Gráfica 1

Países con el mayor número de especies de árboles en el planeta



Fuente: FAO 2020

La extensión de Colombia corresponde a 207 millones de hectáreas, de las cuales 114 millones son del área continental (IDEAM-ONU-REDD). Los tipos fisionómicos generales y su extensión original en el país se describen a continuación en la **Tabla 1**:

Tabla 1

Extensiones generales de bosque

Tipo	Extensión	%
Bosques	94.146.930	82.5%
Arbustales	1.543.390	2.2%
Sabanas	14.128.937	12.6%
Paramos	2.291.240	2.7%

Fuente: *Estado de los Ecosistemas Colombianos: una aplicación de la metodología de la Lista Roja de Ecosistemas (Vers2.0)* Etter A., Andrade A., Saavedra K., Amaya P. y P. Arévalo 2017.

Sin embargo, en la actualidad el 40% de los suelos (45.379.058 hectáreas) presenta algún grado de degradación por erosión incidiendo en la cobertura vegetal original conforme a las extensiones afectadas, como es presentado en la **Tabla 2**.

Tabla 2

Extensiones de suelos afectadas por la erosión

Afectación por erosión	Extensión en hectáreas	%Participación respecto al total nacional
Ligera	22.821.889	20%
Moderada	19.222.575	17%
Severa	3.063.204	3%

Fuente: IDEAM 2021 (SIAC, n.d.)

Dejando como resultado que el 51.7% (58,964,543 hectáreas) del territorio colombiano es categorizado como área bosque natural (IDEAM Boletín 06, 2015), teniendo la siguiente distribución dentro del área continental de las regiones de Colombia como aparece en la **Tabla 3**.

Tabla 3

Extensiones de bosque en Colombia por regiones

Región	Extensión en millones de hectáreas	% de participación
Amazonia	39.7	67%
Los Andes	10.5	18%
Pacífico	5.3	9%
Orinoquia	2.1	4%
Caribe	1.7	3%
Total	59	100%

Fuente: IDEAM-ONU-REDD (2018c)

Áreas de deforestación

La deforestación en Colombia en los últimos 10 años se ha mantenido en un rango de entre las 120 mil hectáreas y las 220 mil hectáreas (DNP, 2020) siendo un factor recurrente en la pérdida de los bosques. Donde se estima que entre el año 2000 y el año 2019 se perdieron cerca de 2,8 millones de hectáreas de bosque.

Gráfica 2

Dinámica Histórica de la deforestación (hectáreas por año)



Fuente: DNP (2020), a partir de datos del (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono, 2020).

Imagen tomada del Documento *CONPES 4021 Política nacional para el control de la deforestación y la Gestión sostenible de los bosques* (DNP, 2020).

Se estima que en Colombia cerca de 1.200.000 personas dependen económicamente del uso de productos forestales no maderables y que la población artesanal podría ascender a 350.000 personas (DNP, 2020).

Causas de la deforestación

Se enumeran tomando en cuenta las causas identificadas por el estudio del IDEAM (IDEAM-ONU-REDD, 2018) seleccionando aquellas que tienen una mayor participación respecto a las extensiones en hectáreas y la participación en el PIB de Colombia de un total de 45.4 millones de hectáreas degradadas en el país.

La frontera agrícola

Resolución 261 de 2018, expedida por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, define la frontera agrícola nacional como el límite que separa las áreas en donde se desarrollan las actividades agropecuarias de las áreas protegidas, de manejo especial y de importancia ecológica (DNP, 2020)

La actividad ganadera mantiene una ocupación de cerca de 34 millones de hectáreas a una tasa de uso de 0.6 hectáreas por cabeza de ganado, participando del 1.6% del PIB nacional, mientras son empleadas cerca de 5 millones de hectáreas para la agricultura (IDEAM, 2021)(SIAC, n.d.).

La actividad minera

La explotación de minas y canteras (incluyendo petróleo y carbón) aportan alrededor del 6% del PIB siendo explotadas 1.2 millones de hectáreas, correspondientes al 1.1% del suelo continental del país,

teniendo como sub-sectores de mayor participación los dedicados a los materiales para la construcción (57%) y en segundo lugar el carbón (17%) (*Así Es Nuestra Colombia Minera | Agencia Nacional de Minería ANM, n.d.*).

Los cultivos ilícitos

Los cultivos ilícitos han mantenido una ocupación de entre 154,000 a 212,000 hectáreas (SIMCI) dando un margen de resiembra de hasta el 30% participando con alrededor del 0.4% del PIB en el periodo 2016-2019 (SIMCI UNODC, 2018) (DANE, 2019) (*¿Cuánto Ha Bajado Extensión de Cultivos Ilícitos En Colombia? | El Nuevo Siglo, n.d.*).

Propiedad de los territorios

Según el IGAC en 2009 se presumía que el Estado poseía cerca del 20.6% de los suelos, los territorios colectivos 30.5%, el SINAP 3.7% y 0.5% a otras comunidades; luego el remanente 44.7% corresponde a la propiedad privada. Sobre los suelos de propiedad privada el 52.1% corresponden a grandes propiedades, 18.1% a propiedades medianas, 19.1% a pequeñas propiedades y 10.6% a microfundios (donde el 80% de los propietarios se consideraban en la pobreza PNUD 2011) (*¿A Quién Le Pertenece La Tierra En Colombia, y Cómo Se Divide El Territorio Por Su Uso?, n.d.*).

Otras figuras de gran importancia para la gestión de los bosques son los territorios colectivos, donde se encuentra aproximadamente el 53 % de los bosques naturales del país, de los cuales el 46 % corresponden a resguardos indígenas y el 7,3 % a territorios colectivos de comunidades negras o afrocolombianas (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

Regulación

A partir del año 1950 la legislación forestal ha sido “diversa”, destacando el Decreto Legislativo 2278 de 1953 y luego en 1959 la declaración de las reservas forestales de la nación siendo su alcance limitado respecto a la explotación de los suelos (DNP, 2020). Luego en los años noventa se crearía la institucionalidad de los Ministerios de Medio Ambiente y la organización del Sistema Nacional Ambiental (SINA), teniendo un nuevo impulso en el año 2010 cuando es reglamentado el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP) y para el 2015 se establece la Agencia Nacional de Tierras como la máxima autoridad de los suelos de la nación. Finalmente, en el año 2017 el Sistema Nacional de Información Forestal (SNIF),

el Inventario Forestal Nacional (IFN) y el Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono (SMBByC) constituirían el Sistema de Información Ambiental para Colombia (DNP, 2020).

Específicamente para el enlace entre las políticas forestales y las emisiones de dióxido de carbono y equivalentes, fue establecido el impuesto al carbono donde se ha logrado la compensación en la emisión de 170 millones de toneladas de carbono obteniendo recursos cercanos a los 650 millones de dólares (ASOCARBONO,2020). Conforme a la normatividad dispuesta para tales efectos descrita a continuación:

Con la reglamentación de la Ley 1753 de 2015 dentro del marco de los objetivos de desarrollo sostenible, se introdujo el Registro Nacional de Reducción de las Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en el ARTICULO 175, RENARE, haciendo parte del Registro Nacional de Programas y Proyectos de acciones para la Reducción de las Emisiones debidas a la Deforestación y la Degradación Forestal de Colombia (REDD+). Reglamentados y administrados por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Así como el ARTÍCULO 177. Donde es habilitado el Certificado del Incentivo Forestal como el documento otorgado por la entidad competente para el manejo y administración de los recursos naturales renovables y del medio ambiente, que otorga el derecho a la persona beneficiaria a obtener directamente al momento de su presentación, por una sola vez y en las fechas, términos y condiciones que específicamente se determinen para la financiación de proyectos productivos forestales y/o silvopastoriles, de acuerdo con la reglamentación que para el efecto expida el Gobierno nacional.

En consecuencia, para el año 2016 se crearía el impuesto al carbono en el ARTICULO 221 de la Ley 1819 siendo un gravamen que recae sobre el contenido de carbono de todos los combustibles fósiles, incluyendo todos los derivados de petróleo y todos los tipos de gas fósil que son usados con fines energéticos, siempre que estos sean usados para la combustión.

Conforme a la Ley 1819 de 2016, en la Parte IX, Artículo 221 en el Párrafo 3

"El impuesto no se causa a los sujetos pasivos que certifiquen ser carbono neutro, de acuerdo con la reglamentación que expida el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible." Igualmente, en el Decreto 926 de 2017 se hace la especificidad en la definición del carbono neutro cómo: " Carbono neutro. Se entiende por carbono neutro la neutralización de las emisiones de GEI asociadas al uso del combustible sobre el cual no se causará el impuesto nacional al carbono." Así como la "Declaración de verificación. Es la manifestación por escrito de una tercera parte acreditada o designada, en la que se demuestran las reducciones o remociones de gases de efecto invernadero logradas por una iniciativa de mitigación de GEI luego de una verificación." Lo anterior permite el uso del mecanismo voluntario de certificación de

reducción y remoción de emisiones conforme al proceso descrito en el Artículo 1.5.5.3. Procedimiento para hacer efectiva la no causación del impuesto nacional al carbono y el Artículo 1.5.5.4. con los Requisitos mínimos del soporte de cancelación voluntaria bajo el Decreto 926 de 2017.

De este modo se establece el objetivo del impuesto *no causable* sobre el carbono, como el medio alternativo de contribución tributaria respecto al impuesto directo a las emisiones de carbono. Donde el contribuyente puede certificar la inversión directa en proyectos de reducción y/o remoción, los cuales según cifras de Asocarbono en lo corrido de 2021 han superado al impuesto directo con un volumen de participación del 53% y un valor acumulado de \$197 millones de dólares.

En paralelo se ha establecido el Programa Nacional de Cupos Transables de Emisión de la Ley 1931 de 2018 para el diseño del marco de regulación de Mercados de Carbono del país. Así como, el Proyecto de Ley 336 de acción climática que tiene como objetivo el manejo sostenible de 2,5 millones de hectáreas y el reporte obligatorio de emisiones de GEI.

A nivel internacional se destacan “la reducción de GEI asociados a la deforestación, el país en conjunto con los gobiernos de Alemania, Noruega y el Reino Unido suscribieron en el año 2015 dos mecanismos de pago por resultados enmarcados en la iniciativa reducción de las emisiones debidas a la deforestación y la Reducción de las emisiones derivadas de la deforestación y la degradación de los bosques (REDD+). En el ámbito subnacional enfocado en la región Amazónica conocido como el Programa Visión Amazonía/REM, y otro a nivel nacional denominado DCI, ambos con el objetivo de aportar a las metas de reducción de deforestación del país, y con ello, disminuir también las emisiones globales de GEI” (DNP, 2020).

Aportes a las políticas sobre soluciones climáticas basadas en la naturaleza

Deforestación evitada

Favorece los servicios ecosistémicos: de la *biodiversidad* al mantener la continuidad de los bosques primarios; del *agua* mejorando la disponibilidad en irrigación, la mitigación de las sequias y la regulación de los hidro-sistemas; de los *suelos* reteniendo el agua y las propiedades biológicas asegurando la salud y productividad de los bosques; y del *aire* por la filtración a través de los bosques favoreciendo la salud (Griscom et al., 2017).

Reforestación

La plantación de árboles favorece los servicios ecosistémicos: de la *biodiversidad* creando corredores y favoreciendo el fortalecimiento de la conservación biológica; del *agua* mejorando la disponibilidad de irrigación, mitigación de las sequías y la regulación de los hidro-sistemas; de los *suelos* medida en el aumento de la fauna, donde los gusanos de tierra sobreviven exclusivamente en áreas de reforestación; y del *aire* por la filtración a través de los bosques favoreciendo la salud (Griscom et al., 2017).

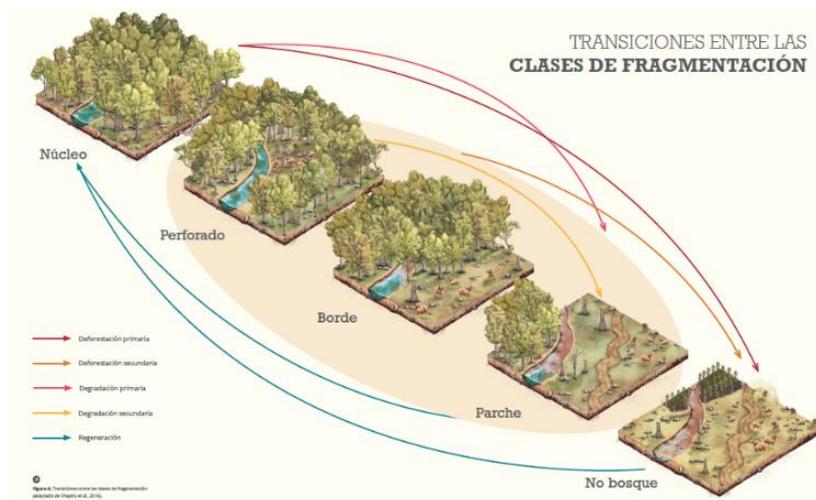
Análisis de fragmentación

“La fragmentación permite realizar estimaciones de la degradación de bosques, ya que no solo implica una reducción del área forestal, sino también la división del bosque remanente en parches que podrían continuar disminuyendo en tamaño con el tiempo. Esto aumenta las áreas de borde y el aislamiento de bosque continuo, generando susceptibilidad en los bordes de los bosques a presentar mayor accesibilidad, menor biomasa, mayor mortalidad de árboles (por tala selectiva insostenible principalmente), menor biodiversidad y mayor presencia de especies invasoras e incendios forestales (citando a: Nepstad et al., 1999; Sala et al., 2000; Laurence, 2004; Vieira et al., 2004; Cayuela et al., 2009; Chaplin-Kramer et al., 2015; Haddad et al., 2015) todas características de un proceso de degradación forestal”. Ramírez-Delgado J.P., Galindo G.A., Yepes A.P., Cabrera E. *Estimación de la degradación de bosques de Colombia a través de un análisis de fragmentación. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – MADS, Programa ONU-REDD Colombia. Bogotá, 2018.*

Por lo anterior es necesario emplear las mayores soluciones basadas en la naturaleza para contrarrestar los efectos de la fragmentación y lograr revertir los procesos de degradación y deforestación de los suelos conforme a sus transiciones.

Figura 1

Transiciones entre las clases de fragmentación



Fuente: IDEAM 2018

Identificación de áreas potenciales para las soluciones basadas en la naturaleza

A través de la metodología de fragmentación es posible determinar las áreas de prioridad para la implementación de las soluciones basadas en la naturaleza, donde las clases denominadas como núcleo deben hacer parte de la *deforestación evitada*, mientras la *reforestación* de los corredores ecológicos podría regenerar los suelos caracterizados como *borde* y *perforados* los cuales acumulan cerca de ocho millones de hectáreas en el país (IDEAM, 2018).

Capacidad de almacenamiento de gases de efecto invernadero

Conforme al estudio del IDEAM es posible estimar el almacenamiento de dióxido de carbono en los bosques de Colombia en aproximadamente 26 Gt dentro de la biomasa aérea, aproximadamente el 2.9% del estimado global de 247 Gt de Carbón es decir alrededor de 905 Gt de dióxido de carbono equivalente (78% sobre el suelo y 22% debajo de los suelos) (Saatchi et al., 2011a)

Tabla 4*Clasificación, extensión y potencial de reservas de los Bosques en Colombia*

Bioma	Hectáreas	Reservas de Toneladas CO2e	de de Toneladas /Hectárea
Bosque húmedo tropical	44,343,684	21,490,836,473	485
Bosque muy húmedo tropical	5,514,120	1,669,842,622	303
Bosque muy húmedo premontano	2,217,396	744,349,777	336
Bosque húmedo montano bajo	1,357,183	734,806,094	541
Bosque muy húmedo montano bajo	1,411,289	673,555,736	477
Bosque pluvial premontano	565,600	221,598,766	392
Bosque húmedo premontano	987,370	206,717,993	209
Bosque muy húmedo montano	861,919	198,441,662	230
Bosque seco tropical	565,621	99,826,115	176
Bosque pluvial montano	356,666	69,656,629	195
Bosque pluvial tropical	206,147	65,144,843	316
Bosque pluvial montano bajo	109,803	21,211,004	193
Bosque muy seco tropical	55,814	10,052,652	180
Bosque seco montano bajo	19,145	7,589,066	396
Bosque húmedo montano	25,713	6,864,316	267
Bosque seco premontano	4,451	1,149,114	258
SubTotal	58,601,921	26,221,642,862	463

Fuente: Estimación de las reservas actuales (2010) de carbono almacenadas en la biomasa aérea en bosques naturales de Colombia (IDEAM, 2010)

Capacidad de absorción

Se estima que las hectáreas de bosque tropical absorben entre 10 y 30 toneladas de dióxido de carbono anualmente a través de la reforestación según *The State of the World's Forests 2000 (FAO, 2000)*. Específicamente para la regeneración natural de bosques de Suramérica se estima una tasa de remoción de dióxido de carbono por año de 18.8 toneladas para el bosque húmedo y 13.8 para el bosque seco (Bernal et al., 2018a). Luego, conforme a la alta sensibilidad y especificidad en la caracterización de los bosques se presenta a manera de referencia el potencial de adicionalidad en la absorción del carbono de 10 a 90 millones de toneladas de dióxido de carbono por año, para los escenarios de reforestación de entre 1 y 5 millones de hectáreas, en el rango de absorción de 10 a 18 toneladas removidas por año y por hectárea. Con ello se plantea el escenario del potencial de absorción para Colombia en la Tabla 7 en función de las hectáreas reforestadas entre 1 y 5 millones, en un rango de absorción de CO2 equivalente

por año por hectárea de 10 a 18 toneladas, dando como resultado el potencial de absorción de 10 millones a 90 millones de toneladas de CO₂e/año/hectárea conforme aparece en la **Tabla 5**.

Tabla 5

Potencial de absorción conforme al número de hectáreas sujetas a reforestación

Toneladas CO ₂ e/Año/Hectárea	Millones de Hectáreas	
	1	5
10	10.00	50.00
12	12.00	60.00
14	14.00	70.00
16	16.00	80.00
18	18.00	90.00

Resultado en millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente por año. Estimaciones propias.

Matriz de eficiencia ambiental y costos adaptada a Colombia

A continuación, se hará la aproximación financiera a los usos del suelo y su productividad conforme a los datos agregados en la participación del Producto Interno Bruto en Colombia conforme a la información disponible con el objetivo de representar sus principales dimensiones.

Uso	Palma	Café	Ganadería	Agricultura	Minería y Canteras	Cultivos de coca
Área en millones de hectáreas	0,6 M Ha	0,85 M Ha	34 M Ha	5 M Ha	1,2 M Ha	0,18 M Ha
Aporte productivo (PIB) en miles de millones de dólares (Billones en inglés)	\$ 1,05 B USD	\$2,2 B USD	\$4.3 B USD	\$12 B USD	\$12,3 B USD	\$2,3 B USD
% Part. PIB	0.4%	0.8%	1.7%	4.7%	4.8%	0.9%
Productividad financiera por hectárea en dólares.	\$1.780 USD	\$2.565 USD	\$125 USD	\$2.392 USD	\$10.297	\$12.667

Fuentes: Fedepalma 2021, Federación Nacional de Cafeteros, DANE 2021 SIMCI UNODC, 2018

Luego con los rangos de potencial de absorción de 10 a 90 millones de toneladas por año y los precios costo efectivos de \$3 a \$30 dolares se obtiene como resultado el tamaño potencial del mercado de Carbono para Colombia de \$30 millones de dolares hasta los \$2,700 millones de dólares conforme a los escenarios propuestos en la **Tabla 6**.

Tabla 6*Matriz de eficiencia ambiental*

\$ Ton	Millones de Toneladas CO2e/año				
	10	25	50	70	90
\$3	\$30	\$75	\$150	\$210	\$270
\$5	\$50	\$125	\$250	\$350	\$450
\$10	\$100	\$250	\$500	\$700	\$900
\$20	\$200	\$500	\$1,000	\$1,400	\$1,800
\$25	\$250	\$625	\$1,250	\$1,750	\$2,250
\$30	\$300	\$750	\$1,500	\$2,100	\$2,700

Resultados en millones de dólares. Estimaciones propias.

Implicaciones sobre el potencial de adopción de las Soluciones Basadas en el Naturaleza para Colombia*Potencial en reforestación*

Colombia podría formular políticas de reforestación a una escala de 1 a 5 millones de hectáreas buscando la mitigación potencial de 90 millones de toneladas de dióxido de carbono por año por hectárea en un escenario bajo respecto al planteado por (Griscom et al., 2017) quienes proyectaban cerca de 295 millones de toneladas, es decir un 30% de lo estimado por ellos. Lo anterior por las limitaciones en la absorción por hectárea, así como el potencial identificado en el análisis de fragmentación donde se estimaron cerca de 8 millones de hectáreas clasificadas como *borde y perforado*.

Potencial en deforestación evitada

Colombia a través de la protección efectiva de sus bosques estimados en 58 millones de hectáreas podría almacenar hasta 26 Giga toneladas de dióxido de carbono equivalente, es decir cerca del 65% emitido a nivel global durante un año. Siendo importante anotar que la anterior estimación podría verse cambiada con el inventario forestal que se planea realizar en el 2022 (IDEAM 2021).

Conclusiones

El capital social tiene un rol esencial en la administración de la respuesta global al cambio climático (IPCC, 2018).

La economía social y solidaria a través de sus empresas asume de manera *implícita* su participación en la *acción por el clima* dentro de los *objetivos de desarrollo sostenible* (Alarcón Conde & Rodríguez, 2020).

El mayor potencial del rol del *capital social* se encuentra en su capacidad de lograr el paso de la *vulnerabilidad* a la *adaptación* climática (Szreter & Woolcock, 2004). Desde las acciones preventivas más allá de las inherentes al manejo exclusivo de las emergencias y las catástrofes.

El potencial para el capital social en Colombia en la gestión de las soluciones basadas en la naturaleza podría tener un alcance 1 a 2 millones de hectáreas, con el objetivo de participar en los mercados de carbono en un rango de los \$100 a los \$500 millones de dólares anuales conforme a los precios y tasas de mitigación planteados.

Bibliografía

- ¿A quién le pertenece la tierra en Colombia, y cómo se divide el territorio por su uso? (n.d.). Retrieved December 10, 2021, from <https://www.larepublica.co/economia/a-quien-le-pertenece-la-tierra-en-colombia-y-como-se-divide-el-territorio-por-su-uso-3026493>
- ¿Cuánto ha bajado extensión de cultivos ilícitos en Colombia? | *El Nuevo Siglo*. (n.d.). Retrieved December 10, 2021, from <https://www.elnuevosiglo.com.co/articulos/03-02-2021-cual-es-la-extension-de-los-cultivos-ilicitos-en-colombia>
- Transnational Agrarian Movements: Confronting Globalization edited by Saturnino M. Borrás Jr, Marc Edelman and Cristóbal Kay . (2009). *Development and Change*. https://doi.org/10.1111/j.1467-7660.2009.01540_4.x
- 2017 U.S. billion-dollar weather and climate disasters: a historic year in context | *NOAA Climate.gov*. (n.d.). Retrieved October 18, 2021, from <https://www.climate.gov/disasters-2017>
- Adger, W. N. (2003). Social capital, collective action, and adaptation to climate change. *Economic Geography*, 79(4). <https://doi.org/10.1111/j.1944-8287.2003.tb00220.x>
- Alarcón Conde, M. Á., & Rodríguez, J. F. Á. (2020). El Balance Social y las relaciones entre los Objetivos de Desarrollo Sostenible y los Principios Cooperativos mediante un Análisis de Redes Sociales. *CIRIEC-España, Revista de Economía Pública, Social y Cooperativa*, 99. <https://doi.org/10.7203/ciriec-e.99.14322>
- Así es nuestra Colombia minera | *Agencia Nacional de Minería ANM*. (n.d.). Retrieved December 10, 2021, from <https://www.anm.gov.co/?q=Asi-es-nuestra-Colombia-minera>
- Bernal, B., Murray, L. T., & Pearson, T. R. H. (2018). Global carbon dioxide removal rates from forest landscape restoration activities. *Carbon Balance and Management*, 13(1). <https://doi.org/10.1186/s13021-018-0110-8>
- Bob, U., & Bronkhorst, S. (2011). Environmental conflicts: Key issues and management implications. *African Journal on Conflict Resolution*. <https://doi.org/10.4314/ajcr.v10i2.63307>
- Corbett, D. C., & Rostow, W. W. (1960). The Stages of Economic Growth: A Non-Communist Manifesto. *International Journal*. <https://doi.org/10.2307/40198523>
- De Coninck, H., & Benson, S. M. (2014). Carbon dioxide capture and storage: Issues and prospects. In *Annual Review of Environment and Resources* (Vol. 39). <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-032112-095222>
- Ellis, F., & Biggs, S. (2001). Evolving themes in rural development 1950s-2000s. *Development Policy Review*. <https://doi.org/10.1111/1467-7679.00143>
- Escobar, A. (2020). Sentipensar with the Earth . In *Pluriversal Politics*.

<https://doi.org/10.1215/9781478012108-005>

Finance - UN Climate Change Conference (COP26) at the SEC – Glasgow 2021. (n.d.). Retrieved October 18, 2021, from <https://ukcop26.org/cop26-goals/finance/>

Fletcher, A. J., Akwen, N. S., Hurlbert, M., & Diaz, H. P. (2020). “You relied on God and your neighbour to get through it”: social capital and climate change adaptation in the rural Canadian Prairies. *Regional Environmental Change*, 20(2). <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01645-2>

Friedlingstein, P., O’Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Hauck, J., Olsen, A., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, S., Le Quéré, C., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S., Aragão, L. E. O. C., Arneeth, A., Arora, V., Bates, N. R., ... Zaehle, S. (2020). Global Carbon Budget 2020. *Earth System Science Data*, 12(4). <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>

Galtung, J. (1990). Cultural Violence. *Journal of Peace Research*. <https://doi.org/10.1177/0022343390027003005>

Griscom, B. W., Adams, J., Ellis, P. W., Houghton, R. A., Lomax, G., Miteva, D. A., Schlesinger, W. H., Shoch, D., Siikamäki, J. V., Smith, P., Woodbury, P., Zganjar, C., Blackman, A., Campari, J., Conant, R. T., Delgado, C., Elias, P., Gopalakrishna, T., Hamsik, M. R., ... Fargione, J. (2017). Natural climate solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(44). <https://doi.org/10.1073/pnas.1710465114>

Homer-Dixon, T. F. (1991). On the Threshold: Environmental Changes as Causes of Acute Conflict. *International Security*. <https://doi.org/10.2307/2539061>

Humphreys, M. (2005). Natural resources, conflict, and conflict resolution: Uncovering the mechanisms. In *Journal of Conflict Resolution*. <https://doi.org/10.1177/0022002705277545>

IPCC. (2018). Global warming of 1.5°C. In *ipcc - Sr15* (Vol. 2, Issue October).

Kay, C. (2001). Los paradigmas del desarrollo rural en América Latina. *Institute of Social Studies*.

Keith, D. W., Holmes, G., St. Angelo, D., & Heidel, K. (2018). A Process for Capturing CO₂ from the Atmosphere. *Joule*, 2(8). <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.05.006>

Lo, A. Y., Liu, S., Cheung, L. T. O., & Chan, F. K. S. (2020). Contested Transformations: Sustainable Economic Development and Capacity for Adapting to Climate Change. *Annals of the American Association of Geographers*, 110(1). <https://doi.org/10.1080/24694452.2019.1625748>

Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L., Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. W., & O. Yelekçi, R. Y. and B. Z. (eds. . (2021). IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.

Parlar, H., Polatcan, M., & Cansoy, R. (2020). The relationship between social capital and innovativeness climate in schools: The intermediary role of professional learning communities. *International Journal of Educational Management*, 34(2). <https://doi.org/10.1108/IJEM-10-2018-0322>

Pelling, M., & High, C. (2005). Understanding adaptation: What can social capital offer assessments of adaptive capacity? *Global Environmental Change*, 15(4). <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2005.02.001>

- Petzold, J. (2016). Limitations and opportunities of social capital for adaptation to climate change: A case study on the Isles of Scilly. *Geographical Journal*, 182(2). <https://doi.org/10.1111/geoj.12154>
- Pitas, N., & Ehmer, C. (2020). Social Capital in the Response to COVID-19. *American Journal of Health Promotion*, 34(8). <https://doi.org/10.1177/0890117120924531>
- Putnam, R. D. (1995). Tuning In, Tuning Out: The Strange Disappearance of Social Capital in America. *PS: Political Science and Politics*, 28(4). <https://doi.org/10.2307/420517>
- Saatchi, S. S., Harris, N. L., Brown, S., Lefsky, M., Mitchard, E. T. A., Salas, W., Zutta, B. R., Buermann, W., Lewis, S. L., Hagen, S., Petrova, S., White, L., Silman, M., & Morel, A. (2011). Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(24). <https://doi.org/10.1073/pnas.1019576108>
- Saavedra, C., Budd, W. W., & Lovrich, N. P. (2012). Assessing Resilience to Climate Change in US Cities. *Urban Studies Research*, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/458172>
- SIAC. (n.d.). *Sistema de Informacion Ambiental de Colombia*. Retrieved December 10, 2021, from http://cifras.siac.gov.co/Portal-SIAC-web/faces/suelo_inicio.xhtml
- Smiley, K. T. (2020). Social Capital and Industrial Air Pollution in Metropolitan America. *Sociological Quarterly*, 61(4). <https://doi.org/10.1080/00380253.2019.1711252>
- Szreter, S., & Woolcock, M. (2004). Health by association? Social capital, social theory, and the political economy of public health. In *International Journal of Epidemiology* (Vol. 33, Issue 4). <https://doi.org/10.1093/ije/dyh013>
- Watson, R. T., Heywood, V. H., Baste, T., Dias, B., Gámez, R., Janetos, T., Reid, W., & Ruark, G. (1995). *Global biodiversity assessment :summary for policy-makers /*. Cambridge University Press, published for UNEP, PP - Cambridge, [England] ; PP - New York :
- Whitmee, S., Haines, A., Beyrer, C., Boltz, F., Capon, A. G., De Souza Dias, B. F., Ezeh, A., Frumkin, H., Gong, P., Head, P., Horton, R., Mace, G. M., Marten, R., Myers, S. S., Nishtar, S., Osofsky, S. A., Pattanayak, S. K., Pongsiri, M. J., Romanelli, C., ... Yach, D. (2015). Safeguarding human health in the Anthropocene epoch: Report of the Rockefeller Foundation-Lancet Commission on planetary health. In *The Lancet* (Vol. 386, Issue 10007). [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(15\)60901-1](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(15)60901-1)
- Wolf, J., Adger, W. N., Lorenzoni, I., Abrahamson, V., & Raine, R. (2010). Social capital, individual responses to heat waves and climate change adaptation: An empirical study of two UK cities.

Matriz 1

Matriz de eficiencia ambiental para la mitigación de gases de efecto invernadero

Conforme a la revisión bibliográfica de los avances en las soluciones para el manejo del cambio climático desde las perspectivas de la tecnología y las provistas por la naturaleza es posible sugerir los siguientes escenarios dentro de la matriz de eficiencia ambiental.

El estado actual de las emisiones de dióxido de carbono se encuentra en el escenario SSP2-4.5 formulado por el IPCC, donde se contemplan emisiones de alrededor de los 40Gt con un estimado de aumento en la temperatura global en el rango de 2.1°C a 3.5°C para el 2100 con un nivel de emisiones objetivo entre 10Gt y 20 Gt (Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen et al., 2021).

Los suelos y los océanos se mantienen por encima del 50% de participación en la capacidad de absorber los gases de efecto invernadero, estimándose en 12 Gt y 9 Gt respectivamente y el remanente es concentrado en la atmosfera (Friedlingstein et al., 2020).

Las soluciones provistas por la naturaleza tienen el potencial de lograr la mitigación adicional 23.8 Gt de dióxido de carbono a nivel global (Griscom et al., 2017).

Los precios observados en los mercados de carbono aún son bajos respecto a las proyecciones realizadas previamente, aunque su cobertura en mitigación de 22% de los Gases de Efecto Invernadero podría ser un indicio del potencial que podría desencadenar (IMF, 2019 y World Bank, 2020).

Las soluciones tecnológicas aún se encuentran en etapa de incubación en tanto la evidencia anecdótica le sitúa en una capacidad por debajo de los 0.05 Gt (De Coninck & Benson, 2014).

Colombia podría tener el potencial de mitigación de 0.3 Gt adicionales de gases de efecto invernadero por año a través de la reforestación indicando la oportunidad para su investigación y exploración como participante de las soluciones basadas en la naturaleza (Griscom et al., 2017).

Matriz de Eficiencia Ambiental		Niveles de gases de dióxido de carbono y otros equivalentes en Gigatonnes							
		5Gt	10Gt	15Gt	20Gt	25Gt	30Gt	35Gt	40Gt
Precios en dólares por mitigación y absorción por Tonelada de Dioxido de Carbono o sus equivalentes	\$ 5.00								
	\$10.00								
	\$15.00	\$ 75,000,000,000	\$ 150,000,000,000	\$ 225,000,000,000	\$ 300,000,000,000	\$ 375,000,000,000	\$ 450,000,000,000	\$ 525,000,000,000	\$ 600,000,000,000
	\$20.00	\$ 100,000,000,000	\$ 200,000,000,000	\$ 300,000,000,000	\$ 400,000,000,000	\$ 500,000,000,000	\$ 600,000,000,000	\$ 700,000,000,000	\$ 800,000,000,000
	\$25.00	\$ 125,000,000,000	\$ 250,000,000,000	\$ 375,000,000,000	\$ 500,000,000,000	\$ 625,000,000,000	\$ 750,000,000,000	\$ 875,000,000,000	\$ 1,000,000,000,000
	\$30.00	\$ 150,000,000,000	\$ 300,000,000,000	\$ 450,000,000,000	\$ 600,000,000,000	\$ 750,000,000,000	\$ 900,000,000,000	\$ 1,050,000,000,000	\$ 1,200,000,000,000
	\$35.00	\$ 175,000,000,000	\$ 350,000,000,000	\$ 525,000,000,000	\$ 700,000,000,000	\$ 875,000,000,000	\$ 1,050,000,000,000	\$ 1,225,000,000,000	\$ 1,400,000,000,000
	\$40.00	\$ 200,000,000,000	\$ 400,000,000,000	\$ 600,000,000,000	\$ 800,000,000,000	\$ 1,000,000,000,000	\$ 1,200,000,000,000	\$ 1,400,000,000,000	\$ 1,600,000,000,000
	\$45.00	\$ 225,000,000,000	\$ 450,000,000,000	\$ 675,000,000,000	\$ 900,000,000,000	\$ 1,125,000,000,000	\$ 1,350,000,000,000	\$ 1,575,000,000,000	\$ 1,800,000,000,000
	\$50.00	\$ 250,000,000,000	\$ 500,000,000,000	\$ 750,000,000,000	\$ 1,000,000,000,000	\$ 1,250,000,000,000	\$ 1,500,000,000,000	\$ 1,750,000,000,000	\$ 2,000,000,000,000
\$55.00	\$ 275,000,000,000	\$ 550,000,000,000	\$ 825,000,000,000	\$ 1,100,000,000,000	\$ 1,375,000,000,000	\$ 1,650,000,000,000	\$ 1,925,000,000,000	\$ 2,200,000,000,000	
\$60.00	\$ 300,000,000,000	\$ 600,000,000,000	\$ 900,000,000,000	\$ 1,200,000,000,000	\$ 1,500,000,000,000	\$ 1,800,000,000,000	\$ 2,100,000,000,000	\$ 2,400,000,000,000	
\$65.00	\$ 325,000,000,000	\$ 650,000,000,000	\$ 975,000,000,000	\$ 1,300,000,000,000	\$ 1,625,000,000,000	\$ 1,950,000,000,000	\$ 2,275,000,000,000	\$ 2,600,000,000,000	
\$70.00	\$ 350,000,000,000	\$ 700,000,000,000	\$ 1,050,000,000,000	\$ 1,400,000,000,000	\$ 1,750,000,000,000	\$ 2,100,000,000,000	\$ 2,450,000,000,000	\$ 2,800,000,000,000	
\$75.00	\$ 375,000,000,000	\$ 750,000,000,000	\$ 1,125,000,000,000	\$ 1,500,000,000,000	\$ 1,875,000,000,000	\$ 2,250,000,000,000	\$ 2,625,000,000,000	\$ 3,000,000,000,000	
\$80.00	\$ 400,000,000,000	\$ 800,000,000,000	\$ 1,200,000,000,000	\$ 1,600,000,000,000	\$ 2,000,000,000,000	\$ 2,400,000,000,000	\$ 2,800,000,000,000	\$ 3,200,000,000,000	



Escenario IPCC 

Soluciones basadas en la naturaleza actual 

Soluciones basadas en la naturaleza adicionalida 

Mercados de carbono 

Las **soluciones tecnológicas** se encuentran por fuera de la matriz, pues aún su costo está por encima de los \$100 dólares por tonelada y su capacidad de captura por debajo de los 0.1 Gt en acumulado. 

Nota: De acuerdo a UN Climate Change Conference UK 2021 (Glasgow COP 26) el objetivo es fondear \$100 mil millones de dólares anuales en finanzas climáticas para los países en desarrollo (*Finance - UN Climate Change Conference (COP26) at the SEC – Glasgow 2021, n.d.*)

Anexo 2: ¿How much and for how long could the annual cost of atmospheric greenhouse gas (CO_2e) abatement between 1960-2020 through carbon pricing be estimated?

Michel Casas-Cuestas

<https://orcid.org/0000-0003-1522-0084>

Ph. D. Candidate at the Environmental and Rural Studies Faculty, Pontifical Xavierian University.

South América, Colombia

Juan Fernando Álvarez-Rodríguez Ph. D

<https://orcid.org/0000-0002-4362-5655>

Tenured Professor at the Environmental and Rural Studies Faculty, Pontifical Xavierian University.

South América, Colombia

Corresponding author: Michel Casas-Cuestas⁷ micuestas@uniandes.edu.co

This work was supported by Pontifical Xavierian University

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of the data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.

Abstract

This document presents the estimated cost and timing of climate change mitigation through carbon pricing based on anthropogenic greenhouse gas emissions for the period from 1960 to 2020. This was done by constructing a matrix of prices using public databases comparing reported emissions (Andrew, 2021; Friedlingstein et al., 2020) and then formulating greenhouse gas storage scenarios that were formed based on cost-effective prices (Griscom et al., 2017). This allowed the range of feasible prices to be determined according to the COP Chair's estimates of annual investment capacity and *the Stern Review on the Economics of Climate Change* (Stern, 2006). Consequently, as a contribution to the knowledge of carbon market prices, annual cost scenarios for climate change management were formulated on the basis of historical emissions and a financial model that compensates for investments, including absorption and storage of greenhouse gases CO_2e , in terms of time in the range of 13 to 63 years and a cost of 50 billion to 1.2 trillion

⁷ Pontificia Universidad Javeriana, Kra 7 # 40- 62 Edificio 67, Piso 8 Facultad de Estudios Ambientales, Departamento de Ecología y Territorio.

dollars. In conclusion, it is possible to use carbon markets to mitigate climate change based on the constraints outlined above by means of natural climate solutions.

Keywords

Carbon pricing; natural climate solutions; climate change; systemic risk

Research question

How much and for how long could the annual cost of atmospheric greenhouse gas (CO_2e^8) abatement between 1960 and 2020 through carbon pricing be estimated?

Introduction

In 1991, Michael Porter of Harvard Business School argued that the conflict between environmental protection and economic competitiveness was a false dichotomy, conceptualized as Porter's hypothesis. This was based on the demonstration of the superior performance of the Japanese and German economies, which adopted environmental regulation in favor of innovation and productivity, thereby strengthening their competitive advantage by reducing investment uncertainty (Porter, 1991). Similarly, in 1992, Andrew Dlugolecki, who was part of the IPPC team that won the Nobel Prize in 2007, reiterated the uncertainty caused by human-induced global warming, predicting a temperature increase between 2.5°C and 3.5°C, with an estimated additional 30 centimeters of sea level rise in Scotland and England by 2050. Therefore, the international insurance industry was alerted to the increased frequency of climatic events and the need to build greater reserves to address them (A. F. Dlugolecki, 1992).

Finally, multilateral agencies have recognized climate change as the primary failure of the market economy for sustainable development and the optimal allocation of capital. This has occasionally led to negative impacts that could limit the returns on capital investments regarding their sustainability and security (Nicholas Stern et al., 2017). This was highlighted by *the Stern Review on the Economics of Climate Change*, which estimated that the costs of climate change could reach 5% of annual global GDP in perpetuity from 2006 onward. It was also highlighted that the cost of mitigation could be lower, estimated at 1% of the global GDP (Nicolas Stern, 2006).

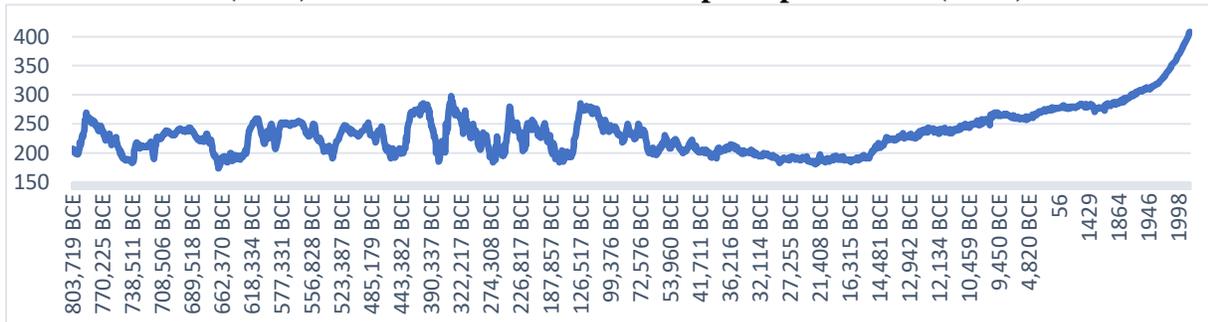
⁸ For the purposes of this document, CO_2e is intended to be the standard measure for greenhouse gas pricing and its equivalents. Therefore, to maintain a consistent format, all emissions figures have been converted to CO_2e measures. Similarly, gigatons are reported as billions of tons.

Background

Specifically, compared with preindustrial levels, greenhouse gas concentrations in the atmosphere have increased by 58% since 2000 (**Figure 1**).

Figure 1

Carbon dioxide (CO₂) concentrations measured in parts per million (PPM)

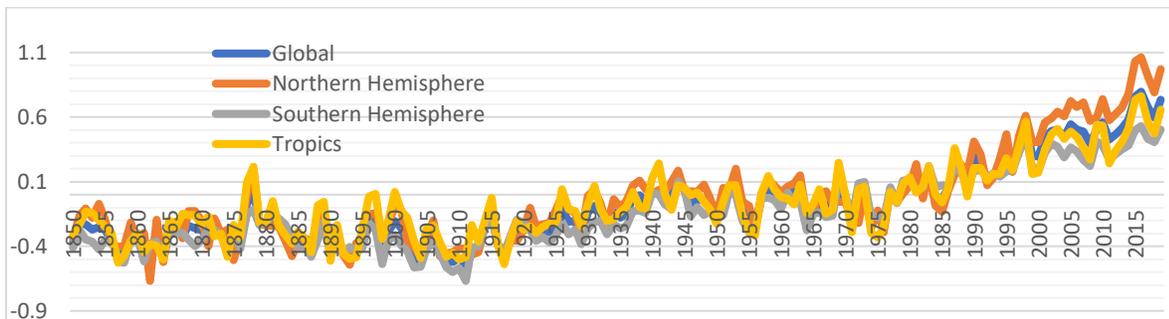


Source: Bereiter, B. Eggleston, S. Schmitt, J. Nehrbass-Ahles, C. Stocker, T. Fischer, H. Kipfstuhl, S. y Chappellaz, J. 2015 (*Atmospheric CO₂ Concentration*, n.d.).

Similarly, tropospheric temperature anomalies roughly corresponded to an increase in the positive trend of an additional 0.8°C of climate variability between 1980 and 2020. This difference was more pronounced over the Northern Hemisphere (**Figure 2**) ((Morice et al., 2021).

Figure 2

Temperature anomalies by region and globally



Source: (Morice et al., 2021) (*Average Temperature Anomaly, Global*, n.d.)

Thus, an r^2 of 80.3% was observed between atmospheric carbon concentrations and temperature anomalies in the Northern Hemisphere from 1980 to 2020 according to the sources in **Figures 1 and 2**, indicating their significant correlation. Similarly, the absence of randomness in

their behavior is a preliminary result of the trend analysis of the data⁹, which is consistent with the argument put forward by the IPCC in its 2021 report on the unequivocal human influence on the warming of the atmosphere, oceans and soils (Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen et al., 2021). Accordingly, evidence of increasing wind speeds and sea levels (Nicolas Stern, 2006), the projection of the latter variable between 52 and 98 centimeters by the year 2100 (Whitmee et al., 2015), and the exposure to risk of approximately 41% of the world's population living in coastal areas have been revealed (Martínez et al., 2007).

Global Carbon Pricing

As an initiative toward the mitigation of greenhouse gases, securities have been formulated based on the mitigation of emissions in tons of carbon dioxide or equivalent of other gases referenced to market carbon prices and taxes. This allows the purchaser to certify the coverage of its emissions, a tool that facilitates its regulation of other types of policies (Harvey et al., 2018).

According to the High-Level Commission on Carbon Prices of the World Bank and the French Ministry for Ecological Transition and Solidarity, target prices should be between \$40 USD and \$80 USD per ton of CO_2e in 2020 and between USD \$50 and USD \$100 per ton of CO_2e in 2030 (Nicholas Stern et al., 2017).

Greenhouse gas storage capacity CO_2e_{stock}

For the tropical regions of Latin America, sub-Saharan Africa and Southeast Asia, it has been estimated that the forest cover of these regions is approximately 2.5 billion hectares, and these regions store approximately 900 gigatons of CO_2e (Saatchi et al., 2011) or an average of 355 tons of CO_2e per hectare¹⁰. This estimate is consistent with the carbon storage capacity of carbon in the biomass of plants, which is approximately 1,400 gigatons CO_2e (Xu et al., 2021).

Specifically, for tropical forests, it would be possible to estimate the storage proxy based on its biomes, as shown in **Table 1**, which originated from the study *of the structure, distribution, and biomass of the world's forests* (Pan et al., 2013).

⁹ Own estimates.

¹⁰ Own estimates.

Table 1**Storage capacity of tropical forest biomes CO_2e_{stock}**

Forest Biomes	Existing million hectares	CO_2e Tons of biomass per hectare	Estimated* CO_2e storage in gigatons (CO_2e_{stock})
Tropical rainforest	1,354 M ha	532 tons per ha	720 Gt
Tropical moist deciduous (monsoon)	795 M ha	268 tons per ha	213 Gt
Tropical dry forest	645 M ha	194 tons per ha	125 Gt
Tropical shrublands	701 M ha	260 tons per ha	182 Gt
Tropical mountain systems	351 M ha	455 tons per ha	160 Gt

Source: (Pan et al., 2013) *own estimates.

For this document, this capacity is defined as CO_2e_{stock} .

Greenhouse gas absorption capacity $\Delta CO_2e_{Absorpt}$

The cumulative emissions between 1990 and 2019 were estimated to be approximately 872 gigatons CO_2e , while during the period between 1750 and 1990, nearly 804 gigatons CO_2e were emitted (Stoddard et al., 2021).

It is estimated that one hectare of tropical forest could absorb 10 to 30 tons of CO_2e annually through reforestation (Janetos et al., 1997). Specifically, for natural regeneration forests in South America, the annual carbon dioxide removal rate is estimated to be 18.8 tons of CO_2e per year for rainforests and 13.8 tons of CO_2e for dry forests (Bernal et al., 2018). Based on these capacities, between 400 million and 800 million hectares would need to be restored to offset 872 gigatons of emissions from 1990 to 2019 (Stoddard et al., 2021), depending on the absorption capacity of the forests. For example, **Table 2** shows an estimate of 10 tons of CO_2e to 30 tons of CO_2e absorbed annually by 400 to 800 million hectares of reforested land. This results in a total of 4 to 24 gigatons that can be stored annually in a forest hectare and accumulate over the long term.

Table 2**Forest absorption capacity $\Delta CO_2e_{Absorpt}$**

Absorption of Gigatons Gt of CO_2e per year	CO_2e Tons absorbed per hectare per year rate		
	10 tons	20 tons	30 tons
Hectares to be reforested			
400,000,000	4 Gt	8 Gt	12 Gt
800,000,000	8 Gt	16 Gt	24 Gt

In addition, natural climate solutions (e.g., reforestation, avoidance of forest conversion, improved forest management, etc.) have been estimated to have an absorption potential of 23.8 gigatons per year, including 678 million hectares that could be reforested (Griscom et al., 2017).

For the purposes of this document, this capacity has been defined as $\Delta CO_2e_{Absorpt}$.

Methodology and data

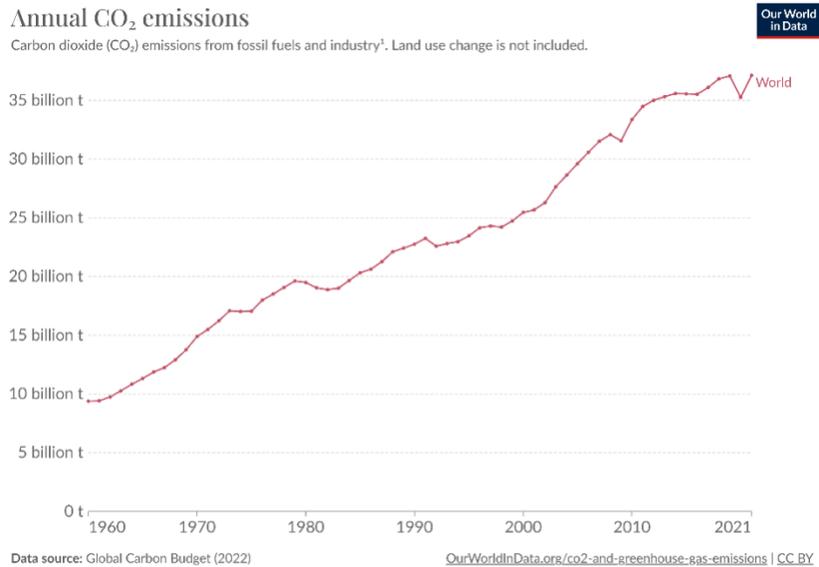
The methodology used was to formulate a matrix of prices and emission units for the management of natural-based climate solutions, considering feasibility scenarios based on cost-effective prices not exceeding USD \$100 per CO_2e ton (Griscom et al., 2017) and global investment prospects.

First, we define P_{CO_2e} as the carbon market price variable and $\Delta CO_2e_{Absorpt}$ as the annual greenhouse gas absorption potential of nature-based climate solutions. The estimated annual mitigation cost, defined as NCS_K , was obtained by multiplying the two variables P_{CO_2e} and $\Delta CO_2e_{Absorpt}$. Using the values obtained for NCS_K , the scenarios were developed within the investment ranges available according to the Conference of the Parties as evidence of the range of investment levels proposed by them.

For the absorption $\Delta CO_2e_{Absorpt}$ target, data were taken from estimates in *The Global Carbon Budget* (Friedlingstein et al., 2023)¹¹, as shown in **Figure 3**.

¹¹ The Global Carbon Budget 2022 has over 105 contributors from 80 organizations and 18 countries. It is widely recognized as the most comprehensive report of its kind.

Figure 3 Annual CO₂e emissions



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

Source: (Friedlingstein et al., 2020)

In addition, for the period from 1960 to 2020, the cumulative atmospheric **CO₂e_{stock}** found in *the global carbon budget* was estimated as follows:

Table 3 Mass of carbon in the atmosphere

Yearly emissions estimate	1960s	1970s	1980s	1990s	2000s	2013-2020	Cumulative ¹² CO ₂ e _{stock}
Atmospheric CO ₂ e	6.2 Gt	10.3 Gt	12.5 Gt	11.4 Gt	14.7 Gt	19.1 Gt	760 Gt

Source: (Friedlingstein et al., 2020)

Second, for prices P_{CO_2e} , cost-effective prices (Griscom et al., 2017) less than 100 dollars per ton of CO₂e were used as a benchmark, which is consistent with the findings of the World Bank, where global carbon prices fluctuate between USD \$5 and USD 120 dollars¹³.

¹² Own estimates.

¹³ World Bank. 2023. State and Trends of Carbon Pricing 2023. Washington, DC: World Bank. doi: 10.1596/978-1-4648-2006-9. License: Creative Commons Attribution CC BY 3.0 IGO.

Based on the above, the following matrix has been proposed to show that cost-effective GHG abatement prices could be between USD \$5 and USD \$60 and total annual costs NCS_K between \$50 billion and \$1.2 trillion per year.

Matrix 1

Carbon price-based costs and annual abatement potential

Total annual cost NCS_K USD billions	Price per ton of CO_2e abated				
CO_2e Gigatons mitigated per year	\$ 5.00	\$ 10.00	\$ 20.00	\$ 30.00	\$ 60.00
10 Gt	\$ 50	\$ 100	\$ 200	\$ 300	\$ 600
12 Gt	\$ 60	\$ 120	\$ 240	\$ 360	\$ 720
15 Gt	\$ 75	\$ 150	\$ 300	\$ 450	\$ 900
17 Gt	\$ 85	\$ 170	\$ 340	\$ 510	\$ 1,020
20 Gt	\$ 100	\$ 200	\$ 400	\$ 600	\$ 1,200

Green shows the combination of prices and abatement potential in gigatons of CO_2e , with a total cost NCS_K of nearly \$100 billion.

In yellow is the combination of prices and abatement potential in gigatons CO_2e , for which the total cost NCS_K is in the range of \$150 to \$300 billion.

The combination of prices and abatement potential in gigatons is shown in orange in CO_2e , where the total cost NCS_K is in the range of \$340 to \$400 billion.

The combination of prices and abatement potential in gigatons is shown in red CO_2e , with a total cost NCS_K in the range of \$450 billion to \$1.2 trillion.

Third, to mitigate atmospheric greenhouse gas emissions, the target proposed in the *Integrated Global Assessment of the Natural Forest Carbon Potential* (Mo et al., 2023) of Restoring 829 gigatons CO_2e_{stock} was adopted, including 319 gigatons CO_2e_{stock} mitigated from deforested and fragmented regions. This would offset the reported cumulative atmospheric emissions of 760 gigatons CO_2e_{stock} (Table 3).

Based on the previous assumptions, the cumulative sequestration scenarios from 2025 to 2100 were projected based on the annual rate of mitigation by natural climate solutions. The maximum rate of 23.8 Gt used was proposed by (Griscom et al., 2017), and the storage target used was derived from *an integrated global assessment of the natural forest carbon potential* (Mo et al., 2023).

Matrix 2

CO_2e_{stock} scenarios using natural climate solutions

Yearly Absorption rate	Cumulative storage of CO_2e_{stock} 2025-2100							
	2038	2041	2043	2049	2053	2070	2088	2100
3 Gt	42	51	57	75	87	138	192	228
5 Gt	70	85	95	125	145	230	320	380
7 Gt	98	119	133	175	203	322	448	532
11 Gt	154	187	209	275	319	506	704	836
13 Gt	182	221	247	325	377	598	832	988
17 Gt	238	289	323	425	493	782	1.088	1.292
19 Gt	266	323	361	475	551	874	1.216	1.444
23 Gt	322	391	437	575	667	1.058	1.472	1.748

Yellow indicates that when the **319 Gt** target is reached, if deforested and fragmented areas are restored, the proposed annual absorption rate ranges from 3 Gt to 23 Gt in the 2025 to 2100 scenario.

Results

According to **Matrix 1**, it has been established that the total mitigation cost NCS_K is within the range of the annual investment of \$100 billion proposed by the Conference of the Parties and the estimated mitigation cost of 1% of the global GDP proposed for its management by the *Stern Review on the Economics of Climate Change* (Nicolas Stern, 2006), i.e., approximately one trillion dollars. Thus, the gigatons of $\Delta CO_2e_{Absorpt}$ are in the range of 10 to 20 gigatons per year,

corresponding to the surplus generated after soils and oceans absorb and store approximately 20 gigatons of CO_2e per year (Friedlingstein et al., 2020).

In view of the above results, it is clear that the benchmark price P_{CO_2e} corresponds to the annual weighting of the global total of emission reduction certificates in tons of CO_2e . Therefore, these prices are obtained after calculation based on the capacity of the carbon certificate issuers; i.e., they could be higher or lower than those shown to obtain the reference price by weighting their mitigation capacity $\Delta CO_2e_{Absorpt}$.

Finally, based on CO_2e_{stock} scenarios using natural climate solutions (Matrix 2), it will take at least 13 to 63 years to offset 319 Gt based on the rate of *greenhouse gas absorption capacity* $\Delta CO_2e_{Absorpt}$, as shown in Table 4.

Table 4

CO_2e Years to offset 319 gigatons of natural climate solutions

Yearly rate of absorption	Year reached for 319 Gt of storage CO_2e_{stock}	Number of years starting in 2025
3	Not available	NA
5	2088	63
7	2070	45
11	2053	28
13	2049	24
17	2043	18
19	2041	16
23	2038	13

Discussion

Based on the results obtained, the feasibility of proposed cost-effective prices below \$100 (Griscom et al., 2017) is acceptable as long as the goal is to mitigate up to 20 gigatons of CO_2e per year, which is equivalent to the excess emissions stored in the atmosphere. However, the reference price could not exceed \$60, as the annual cost would be more than \$1 trillion, which could be unsustainable for the economy as a whole. It is therefore clearly important to improve

global standards for certifying the storage of natural climate solutions to achieve convergence between carbon markets and UN targets.

It is imperative to prioritize natural climate solutions as the main tool for mitigating greenhouse gas emissions in a plausible timeframe due to their large absorption and storage capacities and financial pricing efficiency.

Conclusion

It is possible to use carbon markets to mitigate climate change. However, based on the constraints outlined above, it is important to establish reference prices or curves to prevent the total annual cost of allowances issued from generating speculation or exacerbating information asymmetries between issuers and buyers of carbon certificates.

Declaration of generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

During the preparation of this work, the authors used the *DeepL Translator*, *Curie*, and *DeepL Write* to improve language and readability. After using those services, the authors reviewed and edited the content as needed and take full responsibility for the content of the publication.

Declarations

Ethical Approval

Not applicable

Funding

The authors disclosed receipt of the following financial support for the research, authorship, and publication of this article. This work was supported by Pontifical Xavierian University.

Availability of data and materials

The data that support the findings of this study are openly available in National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) and Met Office Hadley Centre at <https://doi.org/10.15138/9N0H-ZH07> and https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadcrut5/HadCRUT5_accepted.pdf <https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadcrut5/data/HadCRUT.5.0.2.0/download.html>, respectively.

References

Bernal, B., Murray, L. T., & Pearson, T. R. H. (2018). Global carbon dioxide removal rates from forest landscape restoration activities. *Carbon Balance and Management*, 13(1).

<https://doi.org/10.1186/s13021-018-0110-8>

Dlugolecki, A. F. (1992). Insurance Implications of Climatic Change. *The Geneva Papers on Risk and Insurance - Issues and Practice*, 17(3). <https://doi.org/10.1057/gpp.1992.30>

Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Bakker, D. C. E., Hauck, J., Landschützer, P., Le Quéré, C., Luijkx, I. T., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshackl, C., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Anthoni, P., ... Zheng, B. (2023). Global Carbon Budget 2023. *Earth System Science Data*, 15(12), 5301–5369. <https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023>

Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Hauck, J., Olsen, A., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, S., Le Quéré, C., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S., Aragão, L. E. O. C., Arneeth, A., Arora, V., Bates, N. R., ... Zaehle, S. (2020). Global Carbon Budget 2020. *Earth System Science Data*, 12(4). <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>

Griscom, B. W., Adams, J., Ellis, P. W., Houghton, R. A., Lomax, G., Miteva, D. A., Schlesinger, W. H., Shoch, D., Siikamäki, J. V., Smith, P., Woodbury, P., Zganjar, C., Blackman, A., Campari, J., Conant, R. T., Delgado, C., Elias, P., Gopalakrishna, T., Hamsik, M. R., ... Fargione, J. (2017). Natural climate solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(44). <https://doi.org/10.1073/pnas.1710465114>

Harvey, H., Orvis, R., & Rissman, J. (2018). Designing Climate Solutions: A Policy Guide for Low-Carbon Energy. In *Designing Climate Solutions*.

Janetos, A. C., Watson, R. T., Zinyowera, M. C., & Moss, R. H. (1997). *Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses*. *Ecology*, 78(8). <https://doi.org/10.2307/2265930>

Martínez, M. L., Intralawan, A., Vázquez, G., Pérez-Maqueo, O., Sutton, P., & Landgrave, R. (2007). The coasts of our world: Ecological, economic and social importance. *Ecological Economics*, 63(2–3). <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.10.022>

Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L., Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. W., & O. Yelekçi, R. Y. and B. Z. (eds. . (2021). IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.

Mo, L., Zohner, C. M., Reich, P. B., Liang, J., de Miguel, S., Nabuurs, G.-J., Renner, S. S., van den Hoogen, J., Araza, A., Herold, M., Mirzaghali, L., Ma, H., Averill, C., Phillips, O. L., Gamarra, J. G. P., Hordijk, I., Routh, D., Abegg, M., Adou Yao, Y. C., ... Crowther, T. W. (2023). Integrated global assessment of the natural forest carbon potential. *Nature*, 624(7990), 92–101. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06723-z>

Morice, C. P., Kennedy, J. J., Rayner, N. A., Winn, J. P., Hogan, E., Killick, R. E., Dunn, R. J. H., Osborn, T. J., Jones, P. D., & Simpson, I. R. (2021). An Updated Assessment of Near-Surface Temperature Change From 1850: The HadCRUT5 Data Set. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(3). <https://doi.org/10.1029/2019JD032361>

Pan, Y., Birdsey, R. A., Phillips, O. L., & Jackson, R. B. (2013). The structure, distribution, and biomass of the world's forests. In *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* (Vol. 44). <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110512-135914>

Saatchi, S. S., Harris, N. L., Brown, S., Lefsky, M., Mitchard, E. T. A., Salas, W., Zutta, B. R., Buermann, W., Lewis, S. L., Hagen, S., Petrova, S., White, L., Silman, M., & Morel, A. (2011). Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(24). <https://doi.org/10.1073/pnas.1019576108>

Stern, Nicholas, Stiglitz, J. E., Duan, M., Edenhofer, O., Giraud, G., Heal, G., Lebre la Rovere, E., Morris, A., Moyer, E., Pangestu, M., Shukla, P. R., Sokona, Y., & Winkler, H. (2017). High-Level Commission on Carbon Prices. World Bank.

Stern, Nicolas. (2006). *STERN REVIEW: The Economics of Climate Change Executive Summary*. October, 30(3).

Stoddard, I., Anderson, K., Capstick, S., Carton, W., Depledge, J., Facer, K., Gough, C., Hache, F., Hoolohan, C., Hultman, M., Hällström, N., Kartha, S., Klinsky, S., Kuchler, M., Lövbrand, E., Nasiritousi, N., Newell, P., Peters, G. P., Sokona, Y., ... Williams, M. (2021). Three Decades of Climate Mitigation: Why Haven't We Bent the Global Emissions Curve? In *Annual Review of Environment and Resources* (Vol. 46). <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012220-011104>

Whitmee, S., Haines, A., Beyrer, C., Boltz, F., Capon, A. G., De Souza Dias, B. F., Ezeh, A., Frumkin, H., Gong, P., Head, P., Horton, R., Mace, G. M., Marten, R., Myers, S. S., Nishtar, S., Osofsky, S. A., Pattanayak, S. K., Pongsiri, M. J., Romanelli, C., ... Yach, D. (2015).

Safeguarding human health in the Anthropocene epoch: Report of the Rockefeller Foundation-Lancet Commission on planetary health. In *The Lancet* (Vol. 386, Issue 10007).

[https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(15\)60901-1](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(15)60901-1)

Xu, L., Saatchi, S. S., Yang, Y., Yu, Y., Pongratz, J., Anthony Bloom, A., Bowman, K., Worden, J., Liu, J., Yin, Y., Domke, G., McRoberts, R. E., Woodall, C., Nabuurs, G. J., De-Miguel, S., Keller, M., Harris, N., Maxwell, S., & Schimel, D. (2021). Changes in global terrestrial live biomass over the 21st century. *Science Advances*, 7(27). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abe9829>

Anexo 3 The economic potential of carbon pricing to abate emissions generated between 1960 and 2020 through Natural Climate Solutions

Michel Casas-Cuestas¹, Juan Fernando Álvarez-Rodríguez^{2,*}

¹ Ph.D. Candidate at Environmental and Rural Studies Faculty, Pontifical Xavierian University; michel-casas@javeriana.edu.co
<https://orcid.org/0000-0003-1522-0084>

² Ph.D. Tenured Professor at Environmental and Rural Studies Faculty, Pontifical Xavierian University; juan-alvarez@javeriana.edu.co
<https://orcid.org/0000-0002-4362-5655>

* Correspondence: micuestas@uniandes.edu.co ;
Pontificia Universidad Javeriana, Kra 7 # 40- 62 Edificio 67, Piso 8 Facultad de Estudios Ambientales, Departamento de Ecología y Territorio. Bogota Colombia, South America.

Abstract: This document presents the potential of carbon pricing in terms of rural development through natural climate solutions, revealing the capacity to mitigate anthropogenic emissions generated over the period 1960-2020. The methodology employed estimates the forest extension required for the Natural Climate Solutions (NCS) based on their absorption rate and storage capacity. Furthermore, it considers the creation of jobs in rural areas and provides a simulation scenario of the estimated carbon pricing performance. The results estimated a potential of 140 to 400 million new jobs in rural areas (SDG 8), an absorption rate of between 9 Gt and 13 Gt per year, and a storage capacity of 320 Gt in a simulation scenario for 2025 to 2060, which would result in the restoration of approximately 700 to 1,000 million hectares (SDG 13). On the basis of the results obtained, it has been possible to project a general range of carbon pricing scenarios of \$10 to \$30 USD, which are aimed at managing the emissions generated between 1960 and 2020. These scenarios offer economic alternatives to counteract rural-urban migration, with a total cost of \$70 billion to \$400 billion USD per year.

Keywords: Carbon pricing; natural climate solutions; climate change; systemic risk. Sustainable Development Goal 8 Decent work and economic growth; Sustainable Development Goal 13 Climate Action.

Declarations *The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of the data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.*

1. Introduction

For the period of 1960 to 2020 the cumulative atmospheric CO_2e^{14} , found in the global carbon budget was estimated as follows in **Table 1**:

Table 1. Mass of carbon in the atmosphere

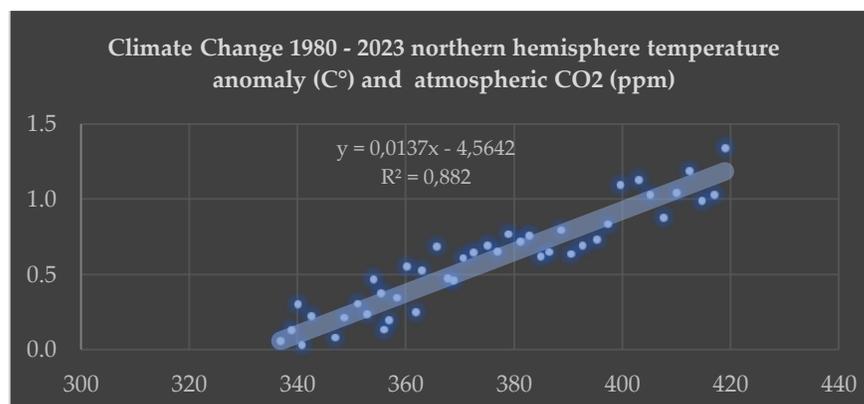
Yearly emissions estimate	1960s	1970s	1980s	1990s	2000s	2013-2020	Cumulative ¹⁵ CO_2e_{stock}
Atmospheric CO_2e	6.2 Gt	10.3 Gt	12.5 Gt	11.4 Gt	14.7 Gt	19.1 Gt	760 Gt

Source:(Friedlingstein et al., 2023)

Besides, as the concentration of greenhouse gases in the atmosphere has increased, tropospheric temperature anomalies have responded in a broadly similar way, based on an r^2 of 0.88¹⁶ found between northern temperature anomaly and atmospheric CO_2e , as seen in **Figure 1**.

Figure 1.

Correlation between northern hemisphere temperature anomaly (C°) and atmospheric CO₂ (ppm)



Sources: Bereiter, B. Eggleston, S. Schmitt, J. Nehrbass-Ahles, C. Stocker, T. Fischer, H. Kipfstuhl, S. y Chappellaz, J. 2015 (Atmospheric CO₂ Concentration, n.d.) (Morice et al., 2021)

In the scientific literature, the study of the phenomenon has been highlighted, as in the research on temperature anomalies (Morice et al., 2021), carbon balance (Andrew, 2021) (Friedlingstein et al., 2023) ,

¹⁴ For the purposes of this document, CO_2e is intended to be the standard measure for greenhouse gas pricing and its equivalents. To ensure consistency, all emissions figures have been converted to CO_2e measures. Similarly, gigatons (Gt) are reported as billions of tons of CO_2e .

¹⁵ Own estimates.

¹⁶ Own estimates.

natural climate solutions (Griscom et al., 2017), economics (Nicolas Stern, 2006), and natural forest carbon (Mo et al., 2023).

Formerly, as an initiative towards the mitigation of greenhouse gases, carbon pricing has been formulated based on the mitigation of emissions in tons of carbon dioxide or the equivalent of other gases *CO₂e*. This allows the purchaser to certify the compensation of its emissions, as a tool that facilitates its regulation concerning other types of policies (Harvey et al., 2018). According to the High-Level Commission on Carbon Prices of the World Bank and the French Ministry for Ecological Transition and Solidarity, target prices should be between USD 40 and USD 80 per ton of *CO₂e* in 2020 and between USD 50 and USD 100 per ton of *CO₂e* in 2030 (Nicholas Stern et al., 2017).

The aim of this research is to provide insight into natural climate solutions (NCS) in terms of *CO₂e* absorption rate and storage capacity, the estimated extension areas to be restored (SDG 13), and rural job creation (SDG 8). This will contribute to the achievement of the UN's target of limiting global temperature increase to 1.5°C under feasible economic scenarios.

2. Materials and Methods

The following variables have been identified as the primary factors influencing the research findings. These include the storage capacity, absorption rate, hectare extent and job creation potential (SDG 8) of natural climate solutions (SDG 13).

2.1. The Greenhouse gas storage capacity *CO₂e_{stock}*

The biomass of the planet has been estimated to store about 1,400 gigatons of *CO₂e* (Xu et al., 2021). Including, the forest cover in the tropical regions of Latin America, Sub-Saharan Africa, and Southeast Asia, which covers about 2.5 billion hectares, where it is estimated to have stored about 900 gigatons of *CO₂e* (Saatchi et al., 2011), averaging 355 tons of *CO₂e* per hectare.

Specifically, for the tropical forest, it would be possible to estimate the storage proxy based on its biomes, as shown in **Table 2** originated in the study *The structure, distribution, and biomass of the world's forests* (Pan et al., 2013). The storage in gigatons *CO₂e_{stock}* was obtained by multiplying the number of hectares for each biome by the *CO₂e* tons of biomass per hectare.

Table 2. Tropical forest biomes storage capacity CO_2e_{stock}

Forest Biomes	Existing million hectares	CO_2e Tons of biomass per hectare	Estimated* CO_2e storage in gigatons (CO_2e_{stock})
Tropical rainforest	1,354 M ha	532 tons per ha	720 Gt
Tropical moist deciduous (monsoon)	795 M ha	268 tons per ha	213 Gt
Tropical dry forest	645 M ha	194 tons per ha	125 Gt
Tropical shrublands	701 M ha	260 tons per ha	182 Gt
Tropical mountain systems	351 M ha	455 tons per ha	160 Gt

Source: (Pan et al., 2013)*own estimates.

In this document, the greenhouse gas storage capacity is defined as CO_2e_{stock} .

2.2. The absorption rate of greenhouse gas $\Delta CO_2e_{Absorpt}$

Between 1750 and 2019, approximately 1,676 gigatons of CO_2e have been emitted. Of this, around 804 gigatons of CO_2e were emitted between 1750 and 1990, and approximately 872 gigatons of CO_2e were emitted between 1990 and 2019 (Stoddard et al., 2021).

As well, it has been estimated that one hectare of tropical forest could absorb between 10 up to 30 tons of CO_2e annually through reforestation (Janetos et al., 1997). Precisely, for the natural regeneration forests in South America, the annual carbon dioxide removal rate per hectare has been estimated at 18.8 tons of CO_2e per year for the rain forests and 13.8 tons of CO_2e for the dry forests (Bernal et al., 2018). Based on the aforementioned absorption rates, it can be estimated that between 500 million and 1,000 million hectares would need to be restored in order to offset 872 gigatons of emissions from 1990 to 2019 (Stoddard et al., 2021). This estimation is dependent on the absorption rate of the forests.

For instance, **Matrix 1** presents a conservative estimate of 9 tons of CO_2e to 13 tons of CO_2e absorbed annually by 700 to 1,000 million hectares of reforested land, resulting in a total of 6 to 13 gigatons that could be stored annually in a forest hectare and collected over the long term.

Matrix 1. Forest absorption capacity $\Delta CO_2e_{Absorpt}$

Absorption of Gigatons Gt of CO_2e per year $\Delta CO_2e_{Absorpt}$	CO_2e Tons absorbed per hectare per year rate $\Delta CO_2e_{Absorpt}$		
	9 tons	11 tons	13 tons
Hectares to be reforested			
700,000,000	6 Gt	8 Gt	9 Gt
800,000,000	7 Gt	9 Gt	10 Gt
900,000,000	8 Gt	10 Gt	12 Gt
1,000,000,000	9 Gt	11 Gt	13 Gt

Similarly, natural climate solutions (e.g. reforestation, avoidance of forest conversion, improved forest management, etc.) have been estimated to have an absorption potential of 23.8 gigatons per year, including 678 million hectares that could be reforested (Griscom et al., 2017).

For the purposes of this document the absorption rate of greenhouse gas has been defined as $\Delta CO_2e_{Absorpt}$.

2.3. Employment creation

Despite the inherent complexity of restoration processes, studies conducted by *Ecosystem Restoration Job Creation Potential in Brazil* (Brancalion et al., 2022) have estimated the creation of approximately 0.42 direct and indirect jobs per hectare in the restoration process. For Brazil, the estimated number of jobs created through the restoration of 12 million hectares was between 1.76 and 4.4 million jobs. These findings are comparable to those of the study '*Restoring Employment and Rural Landscapes: Can Ecological Restoration Usher Rural Economic Revival in the Post-pandemic Period?*' (Goswami et al., 2020). The research indicates that restoring at least 26 million hectares of land could potentially create around 5 million jobs. Based on these estimates, **Matrix 2** was developed to project job creation (SDG 8) through Natural Climate Solutions. The results indicate that between 140 and 400 million jobs could be created, with a range of 700 million to 1,000 million hectares and a labour factor of 0.2, 0.3, and 0.4 per reforested hectare.

Matrix 2. Employment potential by Natural Climate Solutions

Potential jobs (millions)	Labor factor by reforested hectare		
Reforested Hectares (millions)	0,2	0,3	0,4
700	140	210	280
800	160	240	320
900	180	270	360
1.000	200	300	400

2.4. Timeframe for greenhouse gas storage CO_2e_{stock}

To mitigate atmospheric greenhouse gas emissions, the target of restoring 829 gigatons of CO_2e_{stock} proposed in the *Integrated global assessment of the natural forest carbon potential* (Mo et al., 2023) was adopted. This included 319 gigatons of CO_2e_{stock} to be mitigated from deforested and fragmented regions. This would offset the cumulative atmospheric emissions of 760 gigatons CO_2e_{stock} reported in **Table 1**.

According to **Matrix 3**, which presents CO_2e_{stock} storage scenarios using natural climate solutions, it will take at least 25 to 37 years to offset 319 Gt. The storage target used is derived from the *Integrated Global Assessment of the Natural Forest Carbon Potential* (Mo et al., 2023) and the expected CO_2e_{stock} storage could be accomplished between 2049 and 2060, based on the annual $\Delta CO_2e_{Absorpt}$ absorption rate of reforested areas.

Matrix 3 CO_2e_{stock} Time frame scenarios utilising natural climate solutions

CO_2e_{stock}	Cumulative storage of 2025-2060 CO_2e_{stock}		
Yearly Absorption rate $\Delta CO_2e_{Absorpt}$	2049	2053	2060
9 Gt	225	261	324
11 Gt	275	319	396
13 Gt	325	377	468

The chart highlights the projected year for achieving the 319 Gt CO_2e target, assuming reforestation and the restoration of fragmented areas, based on the proposed annual absorption rates of 9 Gt to 13 Gt of CO_2e in the 2049 to 2060 scenarios.

2.5. Carbon pricing P_{CO_2e}

The methodology used was to formulate the matrix of prices and emission units for the management of nature-based climate solutions, considering feasibility scenarios based on cost-effective prices that do not exceeding USD \$100 per CO_2e ton (Griscom et al., 2017) and global investment prospects.

Firstly, we define P_{CO_2e} as the carbon market price variable and $\Delta CO_2e_{Absorpt}$ as the annual greenhouse gas absorption rate of natural-based climate solutions. The annual cost of mitigation, defined as NCS_K , was calculated by multiplying the two variables P_{CO_2e} and $\Delta CO_2e_{Absorpt}$. Subsequently, the scenarios were developed using the values obtained for NCS_K , within the investment ranges specified by the Conference of the Parties, in order to demonstrate the proposed range of investment levels.

Based on the variables outlined above, the proposed **Matrix 4** indicates that the cost-effective prices for GHG abatement could range from USD \$10 to USD \$30. Furthermore, the total annual costs of NCS_K , could range from \$90 billion to \$390 billion per year.

Matrix 4 Carbon pricing based on costs and annual abatement

Total annual cost NCS_K Billions	CO ₂ e Gigatons mitigated per year $\Delta CO_2e_{Absorpt}$	
Price per ton of CO ₂ e abated	9 Gt	13 Gt
\$ 10,0	\$90 B	\$130 B
\$20,0	\$180 B	\$260 B
\$30,0	\$270 B	\$390 B

3. Results

Based on the findings of the **Matrix 1**, it has been indicated that a reforested area of 700 to 1,000 million hectares could absorb between 6 Gt to 13 Gt of CO_2e . This could represent an increase in the current absorption of CO_2e by soils and oceans which absorb and store approximately 20 gigatons of CO_2e per year (Friedlingstein et al., 2020).

In addition, **Matrix 2** presents broad estimates of employment applying Natural-Climate Solutions whereby at least 140 million people could be employed in the implementation of these solutions. This could be an option in order to counter the global trend of rural- to-urban migration.

Nevertheless, the mitigation of a significant storage stock of CO_2e_{stock} will require approximately 25 years in a scenario of 13 Gt of yearly absorption $\Delta CO_2e_{Absorpt}$ as it was presented in **Matrix 3**. This requires a long-term perspective for carbon pricing.

Finally, the total annual cost scenario for natural climate solutions NCS_K was determined based on the yearly absorption rate of 9 Gt to 13 Gt of $\Delta CO_2e_{Absorpt}$. The cost ranges from \$90 to \$390 billion, which

is feasible considering the global annual GDP of \$100 trillion dollars¹⁷. As demonstrated in **Matrix 4**, this is a cost that can be borne by the global economy.

4. Discussion

Carbon pricing could be a pivotal strategy for global development in countering rural-urban migration. The results highlight the significance of carbon markets in achieving large-scale reforestation and the challenges in terms of timing and scale for the proper implementation of these theoretical scenarios.

Consequently, it is imperative to prioritize natural climate solutions as the primary tool for mitigating greenhouse gas emissions under a carbon pricing policy. This is due to their significant absorption and storage capacities, as well as their financial efficiency.

5. Conclusions

Carbon markets have the potential to play a role in mitigating climate change. However, in order to prevent the possibility of speculation or information asymmetries between issuers and purchasers of carbon certificates, it is important to establish reference prices or curves for the total annual cost of allowances issued and to expand the carbon pricing strategy to include absorption and storage dimensions.

Funding: This research was funded by Pontifical Xaverian University.

Data Availability Statement: The data that support the findings of this study are openly available in National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) and Met Office Hadley Centre at <https://doi.org/10.15138/9N0H-ZH07> and https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadcrut5/HadCRUT5_accepted.pdf ; <https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadcrut5/data/HadCRUT.5.0.2.0/download.html> respectively.

Acknowledgments: We thank the Faculty of Environment and Rural Studies and the Institutional and Rural Development Research Team for providing the environment and tools to produce this document.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.

¹⁷ “Data Page: Global GDP over the long run”, part of the following publication: Max Roser, Pablo Arriagada, Joe Hasell, Hannah Ritchie and Esteban Ortiz-Ospina (2023) - “Economic Growth”. Data adapted from World Bank, Bolt and van Zanden, Angus Maddison. Retrieved from <https://ourworldindata.org/grapher/global-gdp-over-the-long-run> [online resource]

References

- Andrew, R. M. P. G. P. (2021). The Global Carbon Project's fossil CO₂ emissions. Our World in Data.
- Bernal, B., Murray, L. T., & Pearson, T. R. H. (2018). Global carbon dioxide removal rates from forest landscape restoration activities. *Carbon Balance and Management*, 13(1). <https://doi.org/10.1186/s13021-018-0110-8>
- Brancalion, P. H. S., de Siqueira, L. P., Amazonas, N. T., Rizek, M. B., Mendes, A. F., Santiami, E. L., Rodrigues, R. R., Calmon, M., Benini, R., Tymus, J. R. C., Holl, K. D., & Chaves, R. B. (2022). Ecosystem restoration job creation potential in Brazil. *People and Nature*, 4(6). <https://doi.org/10.1002/pan3.10370>
- Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Bakker, D. C. E., Hauck, J., Landschützer, P., Le Quéré, C., Luijkx, I. T., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshackl, C., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Anthoni, P., ... Zheng, B. (2023). Global Carbon Budget 2023. *Earth System Science Data*, 15(12), 5301–5369. <https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023>
- Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Hauck, J., Olsen, A., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, S., Le Quéré, C., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S., Aragão, L. E. O. C., Arneeth, A., Arora, V., Bates, N. R., ... Zaehle, S. (2020). Global Carbon Budget 2020. *Earth System Science Data*, 12(4). <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>
- Goswami, R., Bedia, S., & Pandit, N. (2020). Restoring Employment and Rural Landscapes Can Ecological Restoration Usher Rural Economic Revival in the 'Post-pandemic' Period? In *Economic and Political Weekly* (Vol. 55, Issue 49).
- Griscom, B. W., Adams, J., Ellis, P. W., Houghton, R. A., Lomax, G., Miteva, D. A., Schlesinger, W. H., Shoch, D., Siikamäki, J. V., Smith, P., Woodbury, P., Zganjar, C., Blackman, A., Campari, J., Conant, R. T., Delgado, C., Elias, P., Gopalakrishna, T., Hamsik, M. R., ... Fargione, J. (2017). Natural climate solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(44). <https://doi.org/10.1073/pnas.1710465114>
- Harvey, H., Orvis, R., & Rissman, J. (2018). Designing Climate Solutions: A Policy Guide for Low-Carbon Energy. In *Designing Climate Solutions*.
- Janetos, A. C., Watson, R. T., Zinyowera, M. C., & Moss, R. H. (1997). Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses. *Ecology*, 78(8). <https://doi.org/10.2307/2265930>
- Mo, L., Zohner, C. M., Reich, P. B., Liang, J., de Miguel, S., Nabuurs, G.-J., Renner, S. S., van den Hoogen, J., Araza, A., Herold, M., Mirzaghali, L., Ma, H., Averill, C., Phillips, O. L., Gamarra, J. G. P., Hordijk, I., Routh, D., Abegg, M., Adou Yao, Y. C., ... Crowther, T. W. (2023). Integrated global assessment of the natural forest carbon potential. *Nature*, 624(7990), 92–101. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06723-z>
- Morice, C. P., Kennedy, J. J., Rayner, N. A., Winn, J. P., Hogan, E., Killick, R. E., Dunn, R. J. H., Osborn, T. J., Jones, P. D., & Simpson, I. R. (2021). An Updated Assessment of Near-Surface Temperature Change From 1850: The HadCRUT5 Data Set. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(3). <https://doi.org/10.1029/2019JD032361>
- Pan, Y., Birdsey, R. A., Phillips, O. L., & Jackson, R. B. (2013). The structure, distribution, and biomass of the world's forests. In *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* (Vol. 44). <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110512-135914>
- Saatchi, S. S., Harris, N. L., Brown, S., Lefsky, M., Mitchard, E. T. A., Salas, W., Zutta, B. R., Buermann, W., Lewis, S. L., Hagen, S., Petrova, S., White, L., Silman, M., & Morel, A. (2011). Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(24). <https://doi.org/10.1073/pnas.1019576108>

Stern, Nicholas, Stiglitz, J. E., Duan, M., Edenhofer, O., Giraud, G., Heal, G., Lebre la Rovere, E., Morris, A., Moyer, E., Pangestu, M., Shukla, P. R., Sokona, Y., & Winkler, H. (2017). High-Level Commission on Carbon Prices. World Bank.

Stern, Nicolas. (2006). STERN REVIEW: The Economics of Climate Change Executive Summary. October, 30(3).

Stoddard, I., Anderson, K., Capstick, S., Carton, W., Depledge, J., Facer, K., Gough, C., Hache, F., Hoolohan, C., Hultman, M., Hällström, N., Kartha, S., Klinsky, S., Kuchler, M., Lövbrand, E., Nasiritousi, N., Newell, P., Peters, G. P., Sokona, Y., ... Williams, M. (2021). Three Decades of Climate Mitigation: Why Haven't We Bent the Global Emissions Curve? In *Annual Review of Environment and Resources* (Vol. 46). <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012220-011104>

Xu, L., Saatchi, S. S., Yang, Y., Yu, Y., Pongratz, J., Anthony Bloom, A., Bowman, K., Worden, J., Liu, J., Yin, Y., Domke, G., McRoberts, R. E., Woodall, C., Nabuurs, G. J., De-Miguel, S., Keller, M., Harris, N., Maxwell, S., & Schimel, D. (2021). Changes in global terrestrial live biomass over the 21st century. *Science Advances*, 7(27). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abe9829>

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of the editor(s). The editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.