



**COMILLAS**  
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

# MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

## TRABAJO FIN DE MÁSTER COYUNTURA Y RETOS DEL MERCADO VOLUNTARIO DE CARBONO

Autor: Wenceslao Civeira Marín

Director: Miguel Ceballos

Madrid

Julio de 2023

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título **COYUNTURA Y RETOS DEL MERCADO VOLUNTARIO DE CARBONO** en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2022-2023 es de mi autoría, original e inédito y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

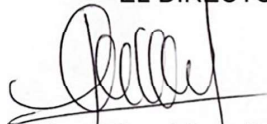


Fdo.: Wenceslao Civeira Marín

Fecha: 17/07/2023

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Miguel Ceballos

Fecha: 19/07/2023



**COMILLAS**  
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

# MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

## TRABAJO FIN DE MÁSTER COYUNTURA Y RETOS DEL MERCADO VOLUNTARIO DE CARBONO

Autor: Wenceslao Civeira Marín

Director: Miguel Ceballos

Madrid

Julio de 2023



# **COYUNTURA Y RETOS DEL MERCADO VOLUNTARIO DE CARBONO**

**Autor:** Civeira Marín, Wenceslao.

Director: Ceballos, Miguel.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

## **RESUMEN DEL PROYECTO**

El mercado voluntario de carbono fue establecido en los años 90 del siglo XX y, en los últimos diez años, ha experimentado un crecimiento considerable, encontrándose actualmente en una fase de madurez. Los agentes de este novedoso mercado han demostrado como sus proyectos son viables, y las expectativas de crecimiento son favorables para los años venideros. Sin embargo, aún existen ciertos puntos de fricción que deben ser subsanados para garantizar ese crecimiento futuro. Entre los más importantes, destacan la falta de transparencia en el mercado, el importante valor absorbido por los intermediarios, la falta de liquidez, y los cuellos de botella derivados del tiempo necesario durante las etapas de validación, monitorización, reporte, y verificación.

En este momento, múltiples soluciones están siendo estudiadas para lograr la escalabilidad del mercado voluntario de carbono. Los distintos agentes involucrados, como las organizaciones que gestionan los estándares de los créditos de carbono, están desarrollando iniciativas para buscar puntos de partida comunes para subsanar los ya mencionados puntos de fricción. En este proyecto se consideran dos de ellas: la digitalización de la medición, reporte y verificación, así como la implementación de tecnología blockchain y la tokenización de los créditos de carbono. El análisis presentado en el proyecto demuestra el potencial de estas soluciones para garantizar el aumento de la eficiencia en el proceso de emisión de créditos de carbono, así como el beneficio que la inclusión de esta tecnología puede repercutir en los desarrolladores de proyectos. El modelo desarrollado ha sido alimentado con una base de datos reales con aproximadamente ocho mil proyectos del mercado voluntario de carbono.

**Palabras clave:** créditos de carbono, adicionalidad, digitalización, tokenización, blockchain.

## 1. Introducción

Una de las principales diferencias entre los mercados regulados y el mercado voluntario de carbono tiene que ver con el horizonte temporal en el que se consideran las emisiones de gases de efecto invernadero. Mientras que, en los mercados regulados, los derechos de emisión adquiridos por una organización tienen un horizonte temporal futuro, en el mercado voluntario de carbono, los créditos de carbono que una organización puede adquirir se refieren a emisiones de carbono evitadas o capturadas, vinculadas a un horizonte temporal pasado. Además, para que un proyecto del mercado voluntario de carbono sea validado para emitir créditos de carbono, es necesario que las actividades involucradas garanticen el concepto de adicionalidad.

Esta característica inherente a cualquier proyecto del mercado reside en la condición de que, de no llevarse a cabo las actividades asociadas al proyecto de emisión de créditos de carbono, no ocurriría la reducción o secuestro de emisiones de gases de efecto invernadero. Para garantizar esta característica principal, además de otras como puede ser la no doble contabilidad de las emisiones, es necesario establecer altos estándares de calidad. En este escenario, los agentes del mercado deben establecer la infraestructura necesaria para garantizar el crecimiento del mercado a la vez que se garantiza la calidad de sus transacciones. Este proyecto pretende analizar distintas propuestas que se encuentran actualmente en estudio.

## 2. Estructura del proyecto

El proyecto se puede dividir en tres grandes fases. La primera, de estudio del estado de la cuestión, en la que se explica el funcionamiento del mercado voluntario de carbono, los agentes involucrados, las interacciones entre ellos, y se presentan las dos soluciones que se considerarán en la fase de análisis. En la segunda fase, se presenta el modelo desarrollado y los datos empleados. En la tercera fase, se lleva a cabo el análisis de la implementación numérica del modelo, así como un análisis de sensibilidad en función de distintos escenarios de oferta y demanda. Por último, se recogen las conclusiones del proyecto.

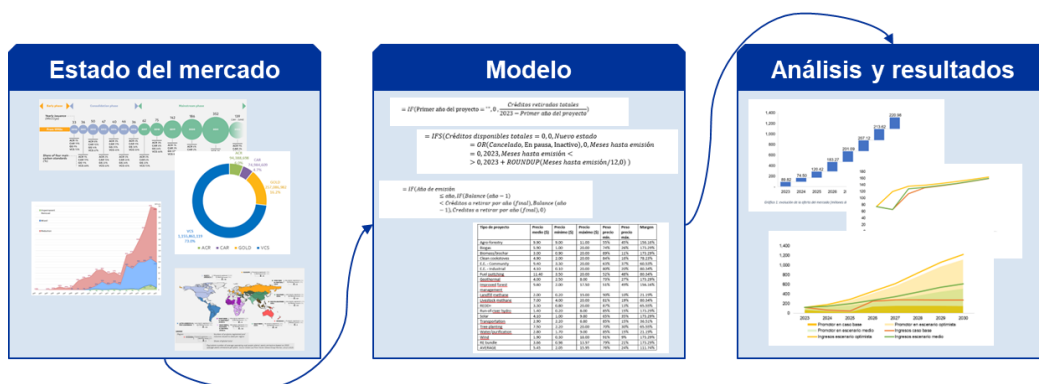


Ilustración 1: estructura del proyecto. Fuente: elaboración propia.

### **3. Metodología**

En este apartado se desarrolla brevemente cómo se han llevado a cabo las fases anteriores. La fase de estudio de la cuestión ha consistido en la revisión de la información más reciente disponible, a través de fuentes secundarias de información. Además, debido a la diversidad de soluciones propuestas por los distintos grupos de investigación sobre la materia, se realizó una selección de dos de las soluciones con mayor impacto estimado para lograr la escalabilidad del mercado, alineadas con las recomendaciones del *Taskforce on Scaling Voluntary Carbon Markets (TSVCM)*.

La fase de desarrollo del modelo se desarrolló gracias a la información disponible en la base de datos de la *Universidad de California* (So, Haya, & Elias, 2023), a partir de la cual se extrajeron las variables más interesantes a partir de las cuales desarrollar el modelo matemático. Por último, la fase de análisis se realizó a través del dibujo de distintos gráficos que permitieran descubrir tendencias y patrones entre los distintos escenarios de oferta y demanda.

### **4. Resultados**

Los resultados del caso base demuestran como el modelo alcanza una saturación de las emisiones de créditos de carbono, mientras que el aumento de la demanda es limitado. La gran diferencia entre los patrones observados entre la oferta y la demanda de créditos de carbono en el mercado hace que el balance de créditos muestre una tendencia positiva en el largo plazo.

En los escenarios de oferta, se aprecia como gracias a la digitalización, el punto de saturación de las emisiones se alcanza antes del tiempo necesario en el escenario base. Sin embargo, en función del escenario (optimista vs medio), el patrón para alcanzar la saturación es distinto.

En los escenarios de demanda, se demuestra como un crecimiento repentino y fuerte de la demanda puede llevar a una “rotura de stock”, haciendo negativo el potencial balance del mercado. Es por ello por lo que se realiza un escenario mixto de oferta y demanda para ver los efectos combinados.

Por último, se realiza un análisis del impacto favorable de la reducción de la intermediación en el mercado como consecuencia de la tokenización de créditos de carbono. Se demuestra como el aumento de la parte de los ingresos que terminan bajo control de los desarrolladoras de proyectos puede llegar a suponer casi el doble del actual.

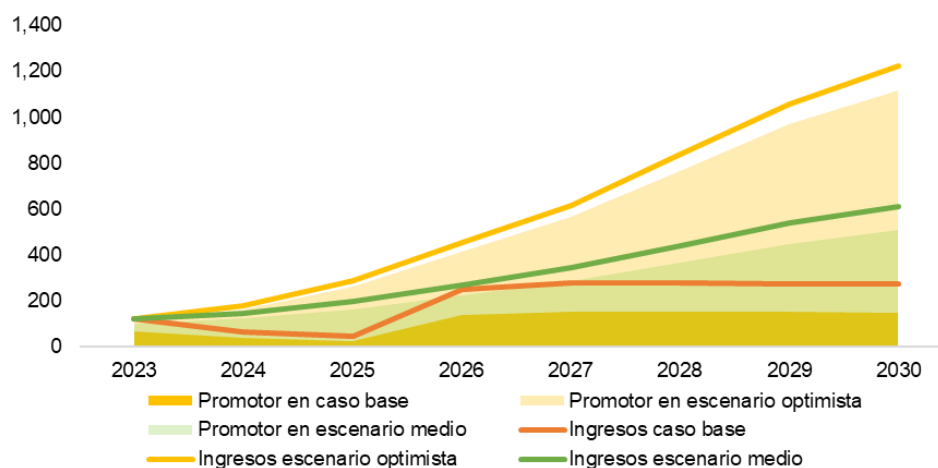


Gráfico 14: proporción de los ingresos que recibe el promotor del proyecto en función del escenario. Fuente: elaboración propia.

## 5. Conclusiones

El mercado voluntario de carbono se encuentra en una fase de consolidación después de gozar de diez años de crecimiento. En este momento, multitud de iniciativas están siendo exploradas para garantizar un crecimiento sostenido en los próximos años, en los que se deberán resolver los actuales puntos de fricción. Es necesario garantizar la integridad del mercado, a la vez que se asegura la calidad de los proyectos y créditos derivados de los mismos. Para ello, la inclusión de la última tecnología disponible puede jugar un papel importante. A través de la digitalización de gran parte de los procesos involucrados en la emisión de los créditos de carbono, puede producirse una reducción en los tiempos necesarios, así como la reducción de costes incurridos.

La relocalización de ese capital puede permitir la democratización de técnicas de medición más avanzadas. Este hecho pondría en movimiento un círculo retroalimentado de mejora continua de la eficiencia y la calidad de los proyectos. Por otro lado, la integración de redes blockchain en el mercado voluntario de carbono puede fortalecer la integridad del mercado, aumentar la transparencia, y mejorar la distribución de los ingresos derivados de la negociación de créditos de carbono en favor de los desarrolladores de proyectos. Esta segunda solución ayudaría a impulsar la liquidez en el mercado.

## 6. Referencias

Algunas de las referencias empleadas en el trabajo son:

- [1] Beken, N. (2022). FAST FORWARD: CHALLENGES TO SCALING THE VOLUNTARY CARBON MARKET. Thallo research.
- [2] Dyck, M. S. (2021). *The Voluntary Carbon Market Explained*. Climate Focus.



- [3] So, I. S., Haya, B. K., & Elias, M. (2023, Mayo 10). Voluntary Registry Offsets Database, Berkeley Carbon Trading Project, University of California. Berkeley, California. Retrieved from Berkeley Carbon Trading Project, University of California, Berkeley: <https://gspp.berkeley.edu/research-and-impact/centers/cepp/projects/berkeley-carbon-trading-project/offsets-database>
- [4] Taskforce on Scaling Voluntary Carbon Markets. (2021). TASKFORCE ON SCALING VOLUNTARY CARBON MARKETS. FINAL REPORT.

# **VOLUNTARY CARBON MARKET CURRENT SITUATION AND ITS CHALLENGES**

**Author:** Civeira Marín, Wenceslao.

Supervisor: Ceballos, Miguel.

Partner Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

## **ABSTRACT**

The voluntary carbon market was established in the 1990s and has experienced considerable growth over the last ten years, being now in a mature phase. The players in this novel market have demonstrated how their projects are viable, and growth expectations are favourable for the years to come. However, there are still some pain points that need to be addressed to ensure such future growth. Among the most important of these are the lack of transparency in the market, the significant value absorbed by intermediaries, the lack of liquidity, and the bottlenecks arising from the time required during the validation, monitoring, reporting, and verification stages.

Multiple solutions are currently being explored to achieve the scalability of the voluntary carbon market. Different stakeholders, such as organisations managing carbon credit standards, are developing initiatives to find common starting points to overcome the aforementioned friction points. This project considers two of them: the digitisation of measurement, reporting and verification, as well as the implementation of blockchain technology and the tokenisation of carbon credits. The analysis presented in the project demonstrates the potential of these solutions to ensure increased efficiency in the process of issuing carbon credits, as well as the benefit that the inclusion of this technology can have on project developers. The developed model has been fed with a real database with approximately eight thousand projects from the voluntary carbon market.

**Key words:** carbon credits, additionality, digitalisation, tokenization, blockchain.

## **1. Introduction**

One of the main differences between the regulated markets and the voluntary carbon market relates to the time horizon over which greenhouse emissions are considered. While in the regulated markets, the emission allowances purchased by an organisation have a future time horizon, in the voluntary carbon market, the carbon credits that an organisation can purchase relate to avoided or captured carbon emissions, linked to a past time horizon. In addition, for a voluntary carbon market project to be validated to issue carbon credits, the activities involved need to ensure the concept of additionality. This inherent characteristic of any market project lies in the condition that, in absence of the activities associated with the carbon credit issuance project, no reduction or capture of greenhouse gas emissions would occur.

To ensure this main feature, in addition to others such as no double counting of emissions, it is necessary to set high quality standards. In this scenario, market players must establish the necessary infrastructure to ensure the growth of the market while guaranteeing the quality of their transactions. This project aims to analyse different proposals currently under consideration.

## 2. Scope of the thesis

This project can be divided into three main phases. The first is a study of the state of the art, in which it is explained the functioning of the voluntary carbon market, which are the agents involved, how do they interact among them, and the two solutions that will be considered in the analysis phase. In the second phase, the model developed, and the data used are presented. In the third phase, the analysis of the numerical implementation of the model is carried out, as well as a sensitivity analysis according to different supply and demand scenarios. Finally, the conclusions of the project are presented.

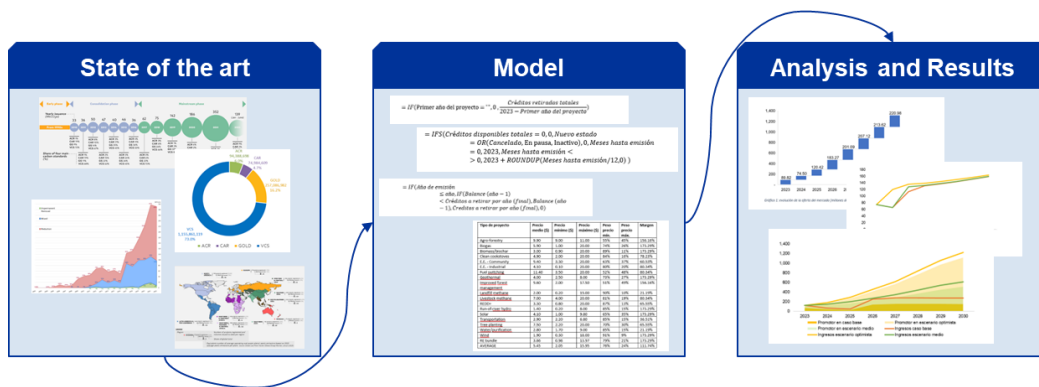


Ilustración 2: scope of the thesis. Source: own work.

## 3. Methodology

This section briefly describes how the previous phases were carried out. The study phase consisted of a review of the most recent information available through secondary sources of information. In addition, due to the diversity of solutions proposed by the different research groups on the subject, a selection was made of two of the solutions with the greatest estimated impact on achieving market scalability, in line with the recommendations of the *Taskforce on Scaling Voluntary Carbon Markets (TSVCM)*. The model development phase was carried out thanks to the information available in the *University of California* database (So, Haya, & Elias, 2023), from which the most interesting data points were extracted from which to develop the mathematical model. Finally, the analysis phase was carried out through the drawing of different graphs that allowed trends and patterns to be discovered between the different supply and demand scenarios.

## 4. Results

The base case results show how the model reaches a saturation of carbon credit emissions, while the increase in demand is limited. The large difference between the observed patterns of supply and demand for carbon credits in the market means that the balance of credits shows a positive trend in the long run. In the supply scenarios, it can be seen that due to digitalisation, the saturation point of emissions is reached earlier than necessary in the base scenario.

However, depending on the scenario (optimistic vs medium), the pattern of reaching saturation is different. In the demand scenarios, it is shown how a sudden and strong growth in demand can lead to “stock-outs”, making the hypothetical balance negative. Therefore, a mixed supply and demand scenario is carried out to see the combined effects. Finally, an analysis is made of the favourable impact of the reduction of the market intermediation as a consequence of carbon credit tokenisation. It is shown how the increase in the share of revenues that end up under the control of project developers can be almost double the current share.

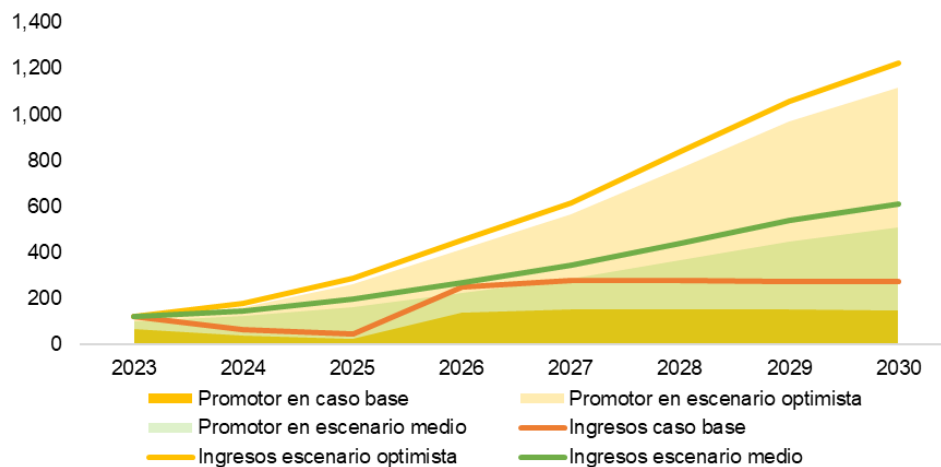


Gráfico 14: proporción de los ingresos que recibe el promotor del proyecto en función del escenario. Fuente: elaboración propia.

## 5. Conclusions

The voluntary carbon market is in a consolidation phase after ten years of growth. A multitude of initiatives are now being explored to ensure sustained growth in the coming years, in which current pain points need to be resolved. The integrity of the market needs to be guaranteed, while ensuring the quality of the projects and credits derived from them. To this end, the inclusion of the latest available technology can play an important role. Through the digitalisation of many of the processes involved in the issuance of carbon credits, there can be a reduction in the time required, as well as a reduction in the costs incurred.

The relocation of this capital can enable the democratisation of more advanced measurement techniques. This would set in motion a feedback loop of continuous improvement in project efficiency and quality. On the other hand, integrating blockchain networks into the voluntary carbon market can strengthen market integrity, increase transparency, and improve the distribution of revenues from carbon credit trading in favour of project developers. This second solution would help boost liquidity in the market.

## 6. References

Some of the references used in the thesis are:

- [1] Beken, N. (2022). FAST FORWARD: CHALLENGES TO SCALING THE VOLUNTARY CARBON MARKET. Thallo research.
- [2] Dyck, M. S. (2021). *The Voluntary Carbon Market Explained*. Climate Focus.
- [3] So, I. S., Haya, B. K., & Elias, M. (2023, Mayo 10). Voluntary Registry Offsets Database, Berkeley Carbon Trading Project, University of California. Berkeley, California. Retrieved from Berkeley Carbon Trading Project, University of California, Berkeley: <https://gspp.berkeley.edu/research-and-impact/centers/cepp/projects/berkeley-carbon-trading-project/offsets-database>
- [4] Taskforce on Scaling Voluntary Carbon Markets. (2021). TASKFORCE ON SCALING VOLUNTARY CARBON MARKETS. FINAL REPORT.

# Índice de ilustraciones

Ilustración 1: estructura del proyecto. Fuente: elaboración propia. ....	6
Ilustración 2: scope of the thesis. Source: own work. ....	11
Ilustración 3: cronología del proyecto. Fuente: elaboración propia a día 27 de abril de 2023. ....	24
Ilustración 4: evolución del Mercado Voluntario de Carbono. Fuente: (Dyck, 2021)...	27
Ilustración 5: evolución de las emisiones de créditos de proyectos de reducción y/o extracción. Fuente: (So, Haya, & Elias, 2023). ....	28
Ilustración 6: distribución de los créditos emitidos por cada registro. Fuente: (So, Haya, & Elias, 2023). ....	28
Ilustración 7: volúmenes anuales de retiradas de créditos (de los cuatro registros mencionados). Fuente: (Dyck, 2021) ....	29
Ilustración 8: evolución de las retiradas de créditos de proyectos de reducción y/o extracción. Fuente: (So, Haya, & Elias, 2023). ....	30
Ilustración 9: créditos emitidos hasta mayo de 2023 por tipo de proyecto (en millones). Fuente: (So, Haya, & Elias, 2023).....	30
Ilustración 10: emisión de créditos en el MVC y proyectos registrados entre 2002-2022. Fuente: (Dyck, 2021).....	31
Ilustración 11: agentes y funcionamiento del MVC. Fuente: (Dyck, 2021).....	37
Ilustración 12: evolución de las emisiones para conseguir el objetivo de 1,5°C. Fuente: (Taskforce on Scaling Voluntary Carbon Markets, 2021). ....	40
Ilustración 13: esquema del dMRV propuesto por Gold Standard. Fuente: (Gold Standard, 2022). ....	46
Ilustración 14: proporción de créditos retirados y tokenizados en el registro de Verra. Fuente: (KlimaDAO, 2023).....	56
Ilustración 15: Tipo de cambio tokens a dólar (EE. UU.) / euro. Fuente: elaboración propia con información de KlimaDAO. ....	57
Ilustración 16: precios históricos de los tokens de carbono. Fuente: (KlimaDAO, 2023). ....	59
Ilustración 17: arquitectura del modelo de Thallo. Fuente: (Thallo, 2023).....	59
Ilustración 18: flujo del proceso de un Smart Contract. Fuente: (Thallo, 2023).....	60
Ilustración 19: precio de los créditos de carbono según su tipo. Fuente: (Opanda, 2023). ....	65

Ilustración 20: ajuste de emisiones transferidas entre países. Fuente: (Dyck, 2021)... 105

# Índice de tablas

Tabla 1: información disponible en la base de datos empleada. Fuente: elaboración propia. .....	64
Tabla 2: precio de los créditos de carbono según su tipo. Fuente: elaboración propia. .	66
Tabla 3: asignación valores de la variable enlace tipo - precio. Fuente: elaboración propia. .....	69
Tabla 4: comparativa del margen que reciben los intermediarios según el tipo de proyecto. Fuente: (AlliedOffsets, 2023). .....	69
Tabla 5: precios y márgenes de los créditos de carbono según tipo de proyecto. Fuente: elaboración propia a partir de (Opanda, 2023) y (AlliedOffsets, 2023). .....	70
Tabla 6: conversión del estado del proyecto. Fuente: elaboración propia. ....	70
Tabla 7: duración estimada de un proyecto. Fuente: elaboración propia a partir de (Beken, 2022). .....	71
Tabla 8: retirada media de créditos por año según tipo de proyecto. Fuente: elaboración propia desde base de datos (So, Haya, & Elias, 2023). .....	73
Tabla 9: resultados implementación numérica del modelo [millones de créditos]. Fuente: elaboración propia. ....	81
Tabla 10: resultados del caso base [millones de créditos]. Fuente: elaboración propia. .	82
Tabla 11: duración estimada de un proyecto bajo el escenario optimista de oferta. Fuente: elaboración propia a partir de (Beken, 2022). .....	85
Tabla 12: duración estimada de un proyecto bajo el escenario medio de oferta. Fuente: elaboración propia a partir de (Beken, 2022). .....	86
Tabla 13: resultados del escenario optimista de oferta [millones de créditos]. Fuente: elaboración propia. ....	86
Tabla 14: resultados del escenario medio de oferta [millones de créditos]. Fuente: elaboración propia. ....	86
Tabla 15: aumento de la demanda con respecto al año anterior. Fuente: elaboración propia. ....	89
Tabla 16: resultados del escenario optimista de demanda [millones de créditos]. Fuente: elaboración propia. ....	90
Tabla 17: resultados del escenario medio de demanda [millones de créditos]. Fuente: elaboración propia. ....	90



Tabla 18: resultados del escenario optimista mixto [millones de créditos]. Fuente: elaboración propia. ....	92
Tabla 19: resultados del escenario medio mixto [millones de créditos]. Fuente: elaboración propia. ....	92
Tabla 20: hipótesis de reparto de ingresos. Fuente: elaboración propia.....	95
Tabla 21: muestra de los datos empleados en el proyecto (1/3). Fuente: (So, Haya, & Elias, 2023).....	106
Tabla 22: muestra de los datos empleados en el proyecto (2/3). Fuente: (So, Haya, & Elias, 2023).....	107
Tabla 23: muestra de los datos empleados en el proyecto (3/3). Fuente: (So, Haya, & Elias, 2023).....	108

## Índice de gráficos

Gráfico 1: evolución de la oferta del mercado [millones de créditos]. Fuente: elaboración propia. ....	82
Gráfico 2: emisiones de créditos de carbono en el mercado [millones de créditos]. Fuente: elaboración propia. ....	83
Gráfico 3: evolución de la demanda del mercado [millones de créditos]. Fuente: elaboración propia. ....	84
Gráfico 4: evolución del balance del mercado [millones de créditos]. Fuente: elaboración propia. ....	84
Gráfico 5: comparativa de las emisiones de créditos de carbono en el mercado en los tres escenarios de oferta [millones de créditos]. Fuente: elaboración propia.....	87
Gráfico 6: comparativa del balance de créditos de carbono en el mercado en los tres escenarios de oferta [millones de créditos]. Fuente: elaboración propia.....	88
Gráfico 7: comparativa de las emisiones de créditos de carbono en el mercado en los tres escenarios de demanda [millones de créditos]. Fuente: elaboración propia.....	90
Gráfico 8: comparativa del balance de créditos de carbono en el mercado en los tres escenarios de demanda [millones de créditos]. Fuente: elaboración propia.....	91
Gráfico 9: comparativa de las emisiones de créditos de carbono en el mercado en los tres escenarios mixtos [millones de créditos]. Fuente: elaboración propia.....	92
Gráfico 10: comparativa del balance de créditos de carbono en el mercado en los tres escenarios mixtos [millones de créditos]. Fuente: elaboración propia.....	93
Gráfico 11: comparativa del balance de créditos de carbono en el mercado en el escenario base, escenario de demanda medio, y escenario mixto de oferta y demanda media [millones de créditos]. Fuente: elaboración propia. ....	93
Gráfico 12: comparativa del balance de créditos de carbono en el mercado en el escenario base, escenario de demanda optimista, y escenario mixto de oferta y demanda optimista [millones de créditos]. Fuente: elaboración propia. ....	94
Gráfico 13: ingresos derivados de la venta de créditos de carbono según los distintos escenarios de demanda [millones de dólares]. Fuente: elaboración propia.....	95
Gráfico 14: proporción de los ingresos que recibe el promotor del proyecto en función del escenario. Fuente: elaboración propia. ....	96

# Contenido

1.	Introducción y planteamiento del proyecto .....	21
1.1	Objetivos del proyecto .....	22
1.2	Metodología .....	23
1.3	Motivación .....	24
2.	Estado de la cuestión .....	25
2.1	El Mercado Voluntario de Carbono (MVC) .....	25
2.1.1	Créditos de carbono y metodología.....	32
2.1.2	Funcionamiento del mercado .....	35
2.1.3	Importancia del MVC: ineficiencias y oportunidades del mercado.....	40
2.2	Propuestas para escalar el Mercado Voluntario de Carbono .....	43
2.2.1	Digitalización de la medición, reporte, y verificación .....	45
2.2.2	El potencial de <i>blockchain</i> en el Mercado Voluntario de Carbono.....	48
2.2.2.A	Tokenización de créditos de carbono .....	49
2.2.2.B	Cómo puede beneficiarse el mercado voluntario de carbono de la tokenización de créditos .....	54
2.2.2.C	Tokenización hoy en día .....	56
3.	Descripción del modelo desarrollado .....	62
3.1	Objetivos del modelo .....	62
3.2	Datos .....	64
3.3	Formulación del modelo .....	74
3.4	Implantación numérica .....	81
4.	Análisis de resultados.....	82
4.1	Resultados del caso base.....	82
4.2	Análisis de sensibilidad .....	85
4.2.1	Escenarios de oferta .....	85
4.2.2	Escenarios de demanda .....	89

4.2.3 Escenarios mixtos.....	92
5. Conclusiones .....	97
6. Bibliografía.....	99
6.1 Referencias.....	99
7. Apéndices .....	103
7.1 Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).....	103
7.2 Base de datos de <i>Berkeley Carbon Trading Project (BCTP)</i> .....	106

# 1. Introducción y planteamiento del proyecto

La Real Academia Española define la palabra *mercado*<sup>1</sup> como un “conjunto de actividades realizadas libremente por los agentes económicos sin intervención del poder público” (Real Academia Española, 2023).

El Mercado Voluntario de Carbono (MVC) es, por tanto, el conjunto de la compra, y venta de créditos de carbono fuera de los mercados regulados, que realizan personas individuales, empresas, y otros agentes del mercado. Este mercado no debe confundirse con, por ejemplo, el régimen de comercio de derechos de emisión de la Unión Europea (RCDE UE), un mercado regulado que establece un límite superior de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

La diferencia entre los créditos de carbono (unidades del MVC) frente a los derechos de emisión (unidades del RCDE UE) tiene que ver con que los derechos de emisión son permisos negociables que autorizan a su titular a emitir una determinada cantidad de GEI en el futuro, mientras que los créditos de carbono representan las emisiones que se secuestraron o evitaron en el pasado.

En lo relativo al funcionamiento de ambos sistemas de comercio de títulos vinculados a emisiones de GEI, en el RCDE UE se establece un periodo en el que se permite emitir una cantidad determinada de emisiones<sup>2</sup> en función de los títulos que se posean, para al final del periodo devolverlos al regulador. Por otro lado, en el MVC los títulos se adquieren y retiran de ese mercado de forma indefinida.

Cada crédito del MVC representa una tonelada de equivalentes de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>e) secuestrada o no emitida. Los equivalentes de dióxido de carbono son una unidad de medida que convierte el potencial de calentamiento global de cualquier Gas de Efecto Invernadero (GEI) en el potencial de GEI de referencia del dióxido de carbono. El año en que se emitió un crédito de carbono define su antigüedad.

Uno de los mayores retos a los que se enfrenta el MVC es el de la escalabilidad. Para impulsar el crecimiento de este mercado de una forma efectiva y eficiente, y ser al mismo tiempo una palanca de cambio que ayude a cumplir los objetivos del Tratado de París, se creó en 2021 la iniciativa liderada por el sector privado *Taskforce on Scaling Voluntary Carbon Markets (TSVCM)*. El análisis del mercado realizado por los miembros de esta iniciativa observa varios puntos débiles a resolver en el mercado actual, que tienen que ver con las barreras de entrada al mercado (especialmente de compradores), la integridad y la calidad de los créditos, así como la relación con los mercados regulados, ya que cambios en estos pueden tener un gran impacto en la demanda en el MVC.

Ante esta problemática, se han planteado distintas soluciones, alineadas con seis recomendaciones compartidas por TSVCM. Una de ellas tiene que ver con la apuesta por la digitalización del mercado, incluyendo soluciones DLT<sup>3</sup> que proporcionen mayor

---

<sup>1</sup> Cuarta definición de la palabra mercado en el diccionario de la Real Academia Española.

<sup>2</sup> El periodo actual comprende el horizonte temporal entre los años 2021 – 2025 (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico del Gobierno de España, 2023).

<sup>3</sup> *Distributed Ledger Technology* (Tecnología de Contabilidad Distribuida).

integridad al mercado, faciliten la negociación de créditos de carbono, resuelvan el problema de la *doble contabilidad*, y reduzcan las fricciones del mercado actual.

Este proyecto de estudio pretende explorar las distintas soluciones que se han propuesto para escalar el MVC a través de la digitalización, centrándose en las oportunidades que presentan tecnologías como las DLT. Un ejemplo de estas soluciones es el *dMRV*<sup>4</sup> propuesto por Gold Standard (Gold Standard, 2022), uno de los cuatro agentes de certificación más grandes de este mercado. Otro de los ejemplos propuestos considera la inclusión de la tecnología blockchain en el mercado, así como la tokenización de créditos de carbono.

Además, se incluirá un estudio del impacto de estas soluciones en la oferta y demanda del mercado voluntario de carbono, a través de un modelo alimentado con una base de datos de la *Universidad de California* (So, Haya, & Elias, 2023).

## 1.1 Objetivos del proyecto

Este proyecto va a desarrollar una propuesta para escalar los mercados voluntarios de carbono. Tras una explicación que defina este mercado, qué partes están involucradas, y cuáles son las dimensiones de este, el proyecto se centrará en las posibilidades de digitalización del mercado como palanca para escalarlo.

Además, el proyecto incluirá un análisis del impacto de la digitalización del mercado en la oferta y en la demanda de créditos de carbono, apoyando la necesidad de impulsar la digitalización del mercado. Por último, se incluirá un análisis económico que sostenga los argumentos favorables de la adopción de nueva tecnología por parte de los agentes del mercado, centrado en los beneficios que recibirán los promotores y desarrolladores de los proyectos.

La propuesta de trabajo está alineada con las recomendaciones 1 – Principios básicos del Carbono y taxonomía de los atributos, 3 – Infraestructura del mercado, 5 – Integridad del mercado, y 6 – Señalización de la demanda, del TSVC, organismo de referencia en la materia. La alineación del proyecto con estas recomendaciones pretende ser una palanca para obtener unos resultados que representen el mayor impacto posible en la escalabilidad del mercado voluntario de carbono. A continuación, se listan los objetivos principales del proyecto:

1. **Proporcionar** una descripción del proceso de emisión de los créditos de carbono en el mercado voluntario de carbono para que el lector pueda entender el desarrollo del proyecto.
2. **Entender** cuál es la situación y estructura del **mercado** actual, para estudiar posibles sinergias o cuellos de botella y, por tanto, proponer soluciones que aumenten la efectividad de su funcionamiento.

---

<sup>4</sup> Digital Monitoring, Reporting, and Verification (Monitorización, notificación, y verificación).

3. **Identificar** los **retos y oportunidades** actuales a los que se enfrenta el mercado voluntario de carbono. Conocer las fortalezas y debilidades, tanto técnicas como económicas, del mercado es necesario para que las alternativas planteadas puedan ser viables y sostenibles en el tiempo.
4. **Estudiar** las diferentes **alternativas** en curso que determinarán la evolución futura de este mercado, centrándose en las alternativas de digitalización. Una vez entendido el funcionamiento del mercado y conocidas las oportunidades que se le presentan, será necesario trazar una estrategia encaminada a conseguir el objetivo último de lograr la escalabilidad del mercado.
5. **Analizar** las estimaciones de **demanda futura** y **medir** el **impacto** de las soluciones estudiadas a través de distintos escenarios de oferta y demanda. A modo de conclusión del proyecto, se cuantificará el impacto que generarán las propuestas desarrolladas en los puntos anteriores a través de un análisis económico, cuantificando los beneficios que éstas reportarán sobre los agentes del mercado.

## 1.2 Metodología

Para el desarrollo de este trabajo se han utilizado fuentes secundarias que ponen en contexto el estado actual de la cuestión. Además, se ha utilizado una base de datos de acceso público que ha permitido llevar a cabo el análisis de la demanda, a modo de fuente primaria de información. Las etapas del desarrollo del trabajo han incluido:

1. **Investigación del estado de la cuestión:** contextualizar la pregunta de investigación, aportando información que soporte la importancia y actualidad de esta, a través de publicaciones de los principales agentes del mercado y/o del mundo académico.
2. **Valoración de los retos y oportunidades del MVC:** basado en documentación desarrollada por voces autorizadas en el ámbito de estudio (i.e., TSVCM, Trove), así como valoración personal del ecosistema del mercado (i.e., introducción de tecnología como blockchain).
3. **Análisis de las alternativas propuestas y de estimaciones de demanda:** desarrollo de un modelo numérico alimentado con la base de datos de la *Universidad de California* (So, Haya, & Elias, 2023).
4. **Redacción de las conclusiones** del proyecto tomando como referencia todas las etapas realizadas anteriormente. Gracias al conocimiento adquirido durante el tiempo dedicado a la investigación y valoración del estado actual del MVC, y sustentado con el análisis realizado con datos reales del mercado.

El desarrollo del trabajo queda recogido en el diagrama de Gantt en la Ilustración 3:

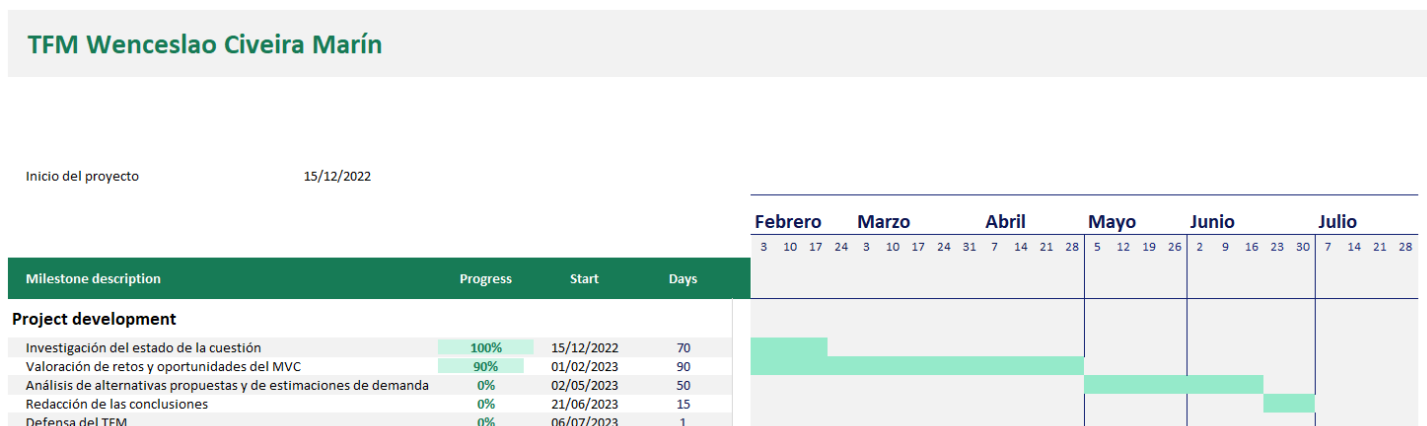


Ilustración 3: cronología del proyecto. Fuente: elaboración propia a día 27 de abril de 2023.

### 1.3 Motivación

Distintos organismos internacionales advierten a la sociedad de la necesidad de actualizar nuestro modelo productivo, de forma que éste se alinee con un modo de desarrollo sostenible en el que el impacto positivo sobre la sociedad y el medioambiente prime sobre el beneficio económico, gestionado a través de técnicas de gobernanza transparentes y de calidad.

El mercado voluntario de carbono, con más de treinta años en funcionamiento, se presenta como una palanca más al servicio de la llamada *transición verde*, que tiene como objetivo reducir el aumento de la temperatura media de la Tierra por debajo de los 2°C, preferiblemente en el entorno de 1,5°C, respecto a niveles preindustriales. Con el desarrollo de nuevas tecnologías y la sensibilización de los inversores, el mercado voluntario de carbono se encuentra en un punto de inflexión a partir del cual escalar su tamaño e impacto.

Desde el punto de vista de la Ingeniería Industrial, y teniendo en cuenta el conocimiento financiero del autor, se pretende desarrollar un proyecto que ofrezca propuestas eficaces desde el punto de vista técnico, así como sostenibles y viables desde el punto de vista económico.

Para ello, y como ha recogido en este capítulo de Introducción y planteamiento del proyecto, se llevará a cabo un estudio del estado actual de la cuestión, teniendo en cuenta a los principales agentes del mercado, así como se analizará la demanda futura, con la intención de cuantificar y calificar qué herramientas pueden ser más eficaces en la tarea de escalar el mercado voluntario de carbono.

El idioma elegido para la redacción del proyecto ha sido el español, con la intención de crear contenido relativo a un tema de gran novedad en la segunda lengua más hablada del mundo.



## 2. Estado de la cuestión

El Mercado Voluntario de Carbono (MVC) se estableció en la década de los años 1990, después de que se produjera por primera vez la financiación de un proyecto para plantar árboles en Guatemala por parte de una compañía energética estadounidense. Sin embargo, no fue hasta los años 2016 - 2017 cuando este mercado se consolidó. El objetivo principal del MVC es mitigar el efecto del cambio climático a través de la financiación de proyectos de evitación, reducción, o secuestro de carbono. Este objetivo ha permitido la creación de un espacio en el que agentes privados, sin intervención de reguladores o supervisores públicos, negocien unos títulos llamados *créditos de carbono*. Con la negociación de estos créditos se pretende financiar proyectos de distinta naturaleza que permitan extraer CO<sub>2</sub> de la atmósfera, así como evitar futuras emisiones de CO<sub>2</sub>.

Una de las características fundamentales y necesarias de los proyectos del mercado voluntario de carbono es a su vez el principal factor que los diferencia de otros proyectos respetuosos con el medio ambiente: el concepto de **adicionalidad**. Este requisito de los proyectos del mercado voluntario de carbono implica que la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> y/o su captura no ocurriría sin el proyecto de emisión de créditos de carbono.

A través de la inversión en este mercado, las empresas, gobiernos, y otras instituciones, así como agentes privados, pueden reducir y/o compensar su huella de carbono. De esta forma, estos agentes alinean sus acciones con sus objetivos climáticos, a la vez que contribuyen al reconocimiento de su marca.

### 2.1 El Mercado Voluntario de Carbono (MVC)

El mercado voluntario de carbono tiene su base en los proyectos a desarrollar, los cuales permiten posteriormente emitir créditos de carbono asociados a las actividades que conlleva cada proyecto. Los promotores y desarrolladores de los proyectos son el primer eslabón de una cadena que involucra a multitud de agentes, y son quienes eligen qué tipo de proyecto desarrollar, en función de sus capacidades.

En general, se pueden diferenciar dos tipos de procesos bajo los cuales se engloban los proyectos del MVC:

1. **Evitar/Reducir:** engloban los proyectos que pretenden evitar la pérdida de zonas naturales (bosques, humedales) que actualmente son uno de los grandes sumideros de CO<sub>2</sub>, así como aquellos que fomentan la reducción de emisiones de fuentes que actualmente no tienen ningún incentivo financiero o regulatorio para llevar a cabo tal reducción (i.e., dispositivos domésticos de ahorro de energía, nuevos procesos industriales, sustitución de combustibles).
2. **Extraer/Secuestrar:** engloban los proyectos basados en tecnologías de extracción de CO<sub>2</sub> de la atmósfera para su posterior almacenamiento en la geosfera, o soluciones basadas en la naturaleza que secuestran CO<sub>2</sub> (i.e., reforestación, recuperación de suelos, humedales).

Las recomendaciones del TSVCM contemplan ambos tipos de proyectos recién mencionados para alcanzar los objetivos de limitar el aumento de la temperatura del planeta a 1,5°C. Sin embargo, en el largo plazo, las recomendaciones contemplan que los flujos de capital se redirijan hacia proyectos de extracción que garanticen un almacenamiento de CO<sub>2</sub> permanente (Taskforce on Scaling Voluntary Carbon Markets, 2021).

Cada crédito del MVC representa una tonelada de CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub>e)<sup>5</sup> que es secuestrada o que se ha evitado emitir. Los créditos son emitidos, contabilizados vinculados a un proyecto y en una jurisdicción determinada, y certificados según un estándar de carbono.

Los estándares de carbono (*carbon standards*, en inglés) son, por lo general, organizaciones privadas que desarrollan una metodología a través de la cual se establecen unos requisitos y reglas que sirven de guía para los promotores de los proyectos en la fase de diseño/planificación de los proyectos. En la actualidad, y puesto que no hay un organismo central que regule el MVC, existen cuatro estándares que dominan el mercado en lo que a volumen de emisión de créditos se refiere: *Verified Carbon Standard (VCS)*, *Gold Standard (GS)*, *Climate Action Reserve (CAR)*, y *American Carbon Registry (ACR)*<sup>6</sup> (Dyck, 2021). Los estándares son gestionados por organizaciones que tienen un registro, en el cual se almacena toda la información de los proyectos (i.e., Verra es la organización que gestiona el estándar *VCS*, que además tiene un registro de créditos de carbono).

Para generar créditos de carbono se deben diseñar las actividades a realizar y, al implementar el proyecto, las reducciones y capturas de GEI deben ser monitorizadas, reportadas, y verificadas. La calidad del crédito de carbono posteriormente emitido y negociado dependerá de la precisión con la que dichas actividades se hayan llevado a cabo.

Por lo general y a colación del carácter voluntario del mercado, la mayoría de los proyectos son promovidos por empresas privadas u organizaciones no gubernamentales. Sin embargo, los gobiernos también pueden promover proyectos, englobados bajo la etiqueta *REDD+* (*Reducing Emissions from Deforestation and Degradation plus*). Los proyectos se definen para ser implementados en una localización geográfica y un tiempo determinados, y son aprobados, validados, monitorizados, y verificados por un registro de carbono.

Para tomar el pulso al MVC se pueden considerar distintos enfoques: a) el crecimiento del mercado, b) el volumen de créditos de carbono negociados y retirados<sup>7</sup>, y c) el ámbito geográfico de los proyectos.

En la Ilustración 4 se muestra la evolución del MVC en función del volumen de emisiones de créditos, medidos a través de megatoneladas de CO<sub>2</sub> equivalente, así como la cuota de mercado de los cuatro principales estándares de certificación del mercado.

---

<sup>5</sup> La medida de equivalentes de CO<sub>2</sub> convierte el potencial de calentamiento global de cualquier gas de efecto invernadero en referencia al potencial del propio CO<sub>2</sub>.

<sup>6</sup> Ver cuotas de mercado de cada registro en Ilustración 4.

<sup>7</sup> Por retirada de créditos se entiende la compra de un crédito de reducción de emisiones depositado en un banco con el fin de retirarlo definitivamente del registro de emisiones.

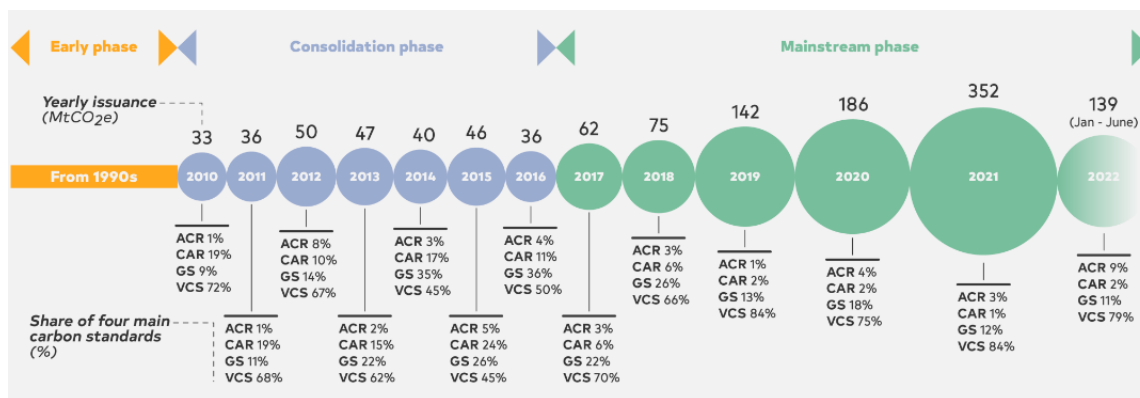


Ilustración 4: evolución del Mercado Voluntario de Carbono. Fuente: (Dyck, 2021)

Como se comentó al principio de este capítulo, el primer acuerdo de compensación de carbono se llevó a cabo a finales de los años 1980 entre una compañía energética estadounidense y una ONG en Guatemala. En los años 1990, se lanzó el *Environmental Resources Trust*, que sería después renombrado como *American Carbon Registry (ACR)*. Este se convirtió en el primer registro privado para compensaciones voluntarias en Estados Unidos.

Posteriormente, se establecieron mecanismos de cumplimiento como resultado del Protocolo de Kyoto, como el Mecanismo de Desarrollo Limpio (*Clean Development Mechanism*, 2004). En este momento, y en paralelo a los mercados regulados, es cuando lentamente comienza a crecer el mercado voluntario de carbono. En estos años se establecen los cuatro registros ya mencionados en el trabajo (ver Ilustración 4).

El mercado voluntario de carbono ha crecido rápidamente desde 2016 después de un crecimiento modesto durante la década anterior. Sin embargo, los mercados internacionales derivados de mecanismos de cumplimiento siguen englobando un mayor volumen de emisiones de GEI que las del mercado voluntario de carbono. Dicho esto, también es importante destacar que el MVC está creciendo relativamente a los mercados de mecanismos de cumplimiento, dada la creciente demanda por créditos de carbono de agentes privados fuera de los mercados regulados.

Para ver datos más recientes del MVC, el programa de investigación *Berkeley Carbon Trading Project*<sup>8</sup> ha desarrollado una base de datos que contiene todos los proyectos del mercado voluntario de carbono, las emisiones de créditos asociadas, y las retiradas de créditos registrados en los cuatro principales registros a nivel mundial (también incluye aquellos del registro *California Air Resources Board, ARB*).

<sup>8</sup> Más información en su página web ([aquí](#)) y en el apéndice 7.2 Base de datos de *Berkeley Carbon Trading Project (BCTP)*.

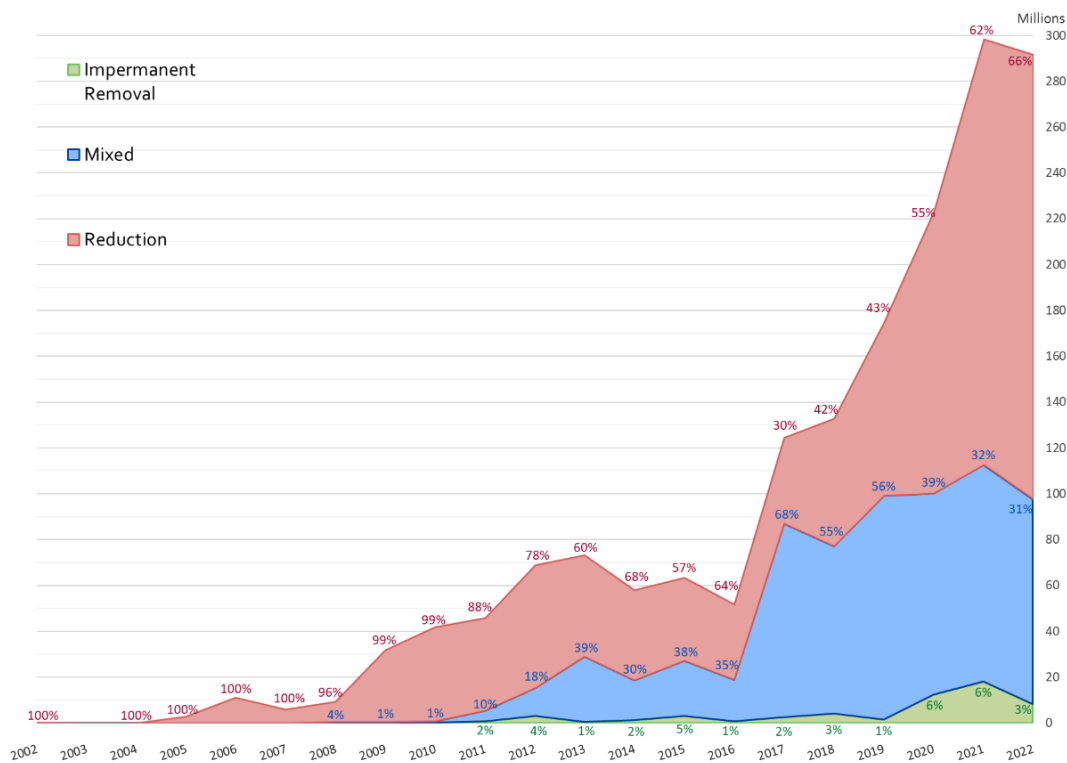


Ilustración 5: evolución de las emisiones de créditos de proyectos de reducción y/o extracción. Fuente: (So, Haya, & Elias, 2023).

Actualizada en mayo de 2023, la información recogida en la base de datos sigue mostrando un fuerte aumento de la emisión de créditos de carbono, así como la clara posición dominante de VCS en el mercado, a la vez que GS y CAR aumentan su peso relativo en el MVC. Esta información queda recogida en la Ilustración 5 y la Ilustración 6.

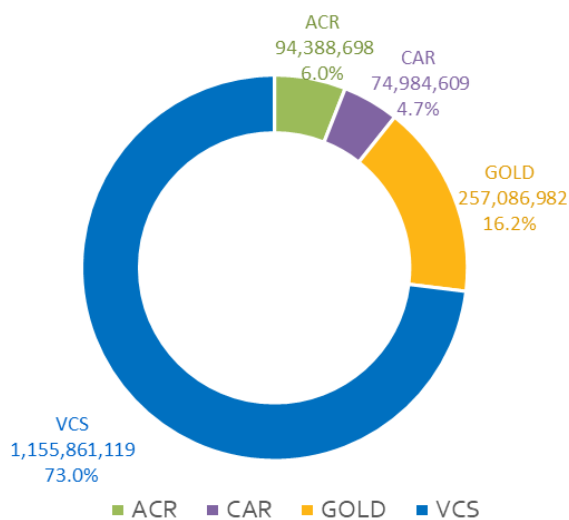


Ilustración 6: distribución de los créditos emitidos por cada registro. Fuente: (So, Haya, & Elias, 2023).

Otra forma de mostrar la creciente demanda de créditos de carbono en el MVC es a través de las retiradas de créditos. Los créditos se retiran cuando un usuario final los adquiere y los destina a compensar emisiones de carbono u otros objetivos no compensatorios. Si con el tiempo se retiran más créditos, está claro que hay una demanda creciente de ese tipo de créditos.

Las retiradas de créditos del MVC aumentaron significativamente entre 2016 y 2021, en particular de soluciones basadas en la naturaleza y actividades de energías renovables (Dyck, 2021).

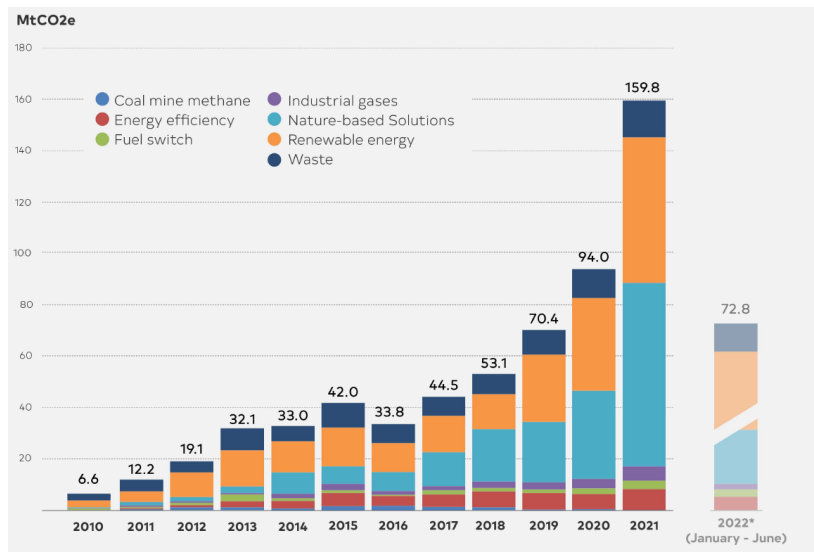


Ilustración 7: volúmenes anuales de retiradas de créditos (de los cuatro registros mencionados). Fuente: (Dyck, 2021)

Los datos más recientes de la base de datos de la Universidad de California demuestran como en el año 2021 se alcanzó un pico de retiradas (como predecía (Dyck, 2021)), produciéndose un ligero descenso en el año 2022 (ver Ilustración 8).

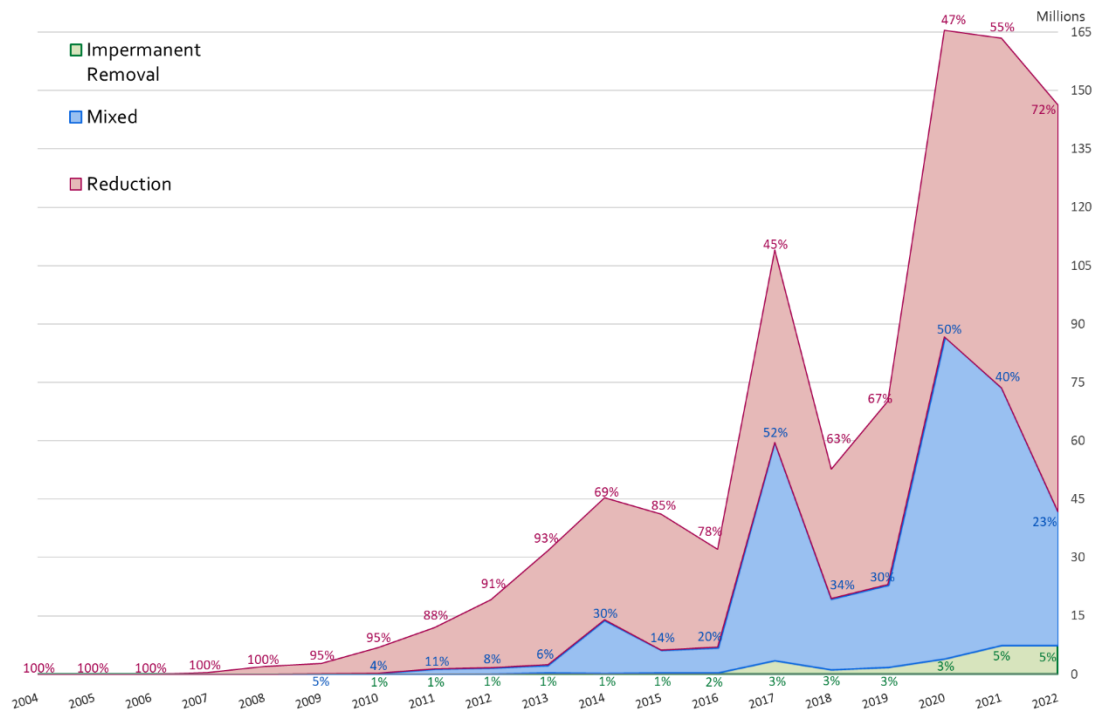


Ilustración 8: evolución de las retiradas de créditos de proyectos de reducción y/o extracción. Fuente: (So, Haya, & Elias, 2023).

Además, los datos demuestran como los proyectos basados en la naturaleza y de energías renovables siguen dominando el mercado (ver Ilustración 9).

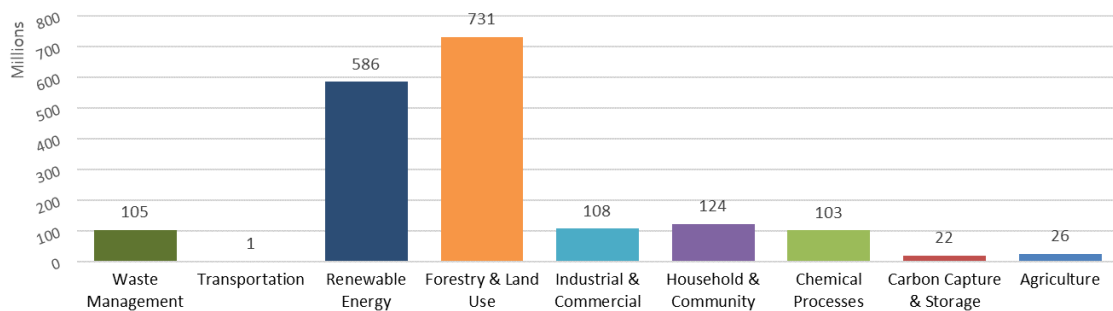


Ilustración 9: créditos emitidos hasta mayo de 2023 por tipo de proyecto (en millones). Fuente: (So, Haya, & Elias, 2023)

Por último, es importante considerar el ámbito geográfico del mercado voluntario de carbono, así como de sus emisiones. Esto tiene sentido al observar que algunas regiones contribuyen en mayor medida a la compensación de emisiones en comparación al volumen que emiten (algunos países subdesarrollados), mientras que otras regiones contribuyen desproporcionadamente a las emisiones globales mientras que sus compensaciones apenas tienen efecto. Más de la mitad de los créditos del mercado voluntario de carbono se generan en proyecto en Asia.

En la Ilustración 10 se pueden observar ambas mediciones por regiones, considerando las emisiones de CO<sub>2</sub> en proporción a lo que emitiría una planta de generación eléctrica de carbón en un año.

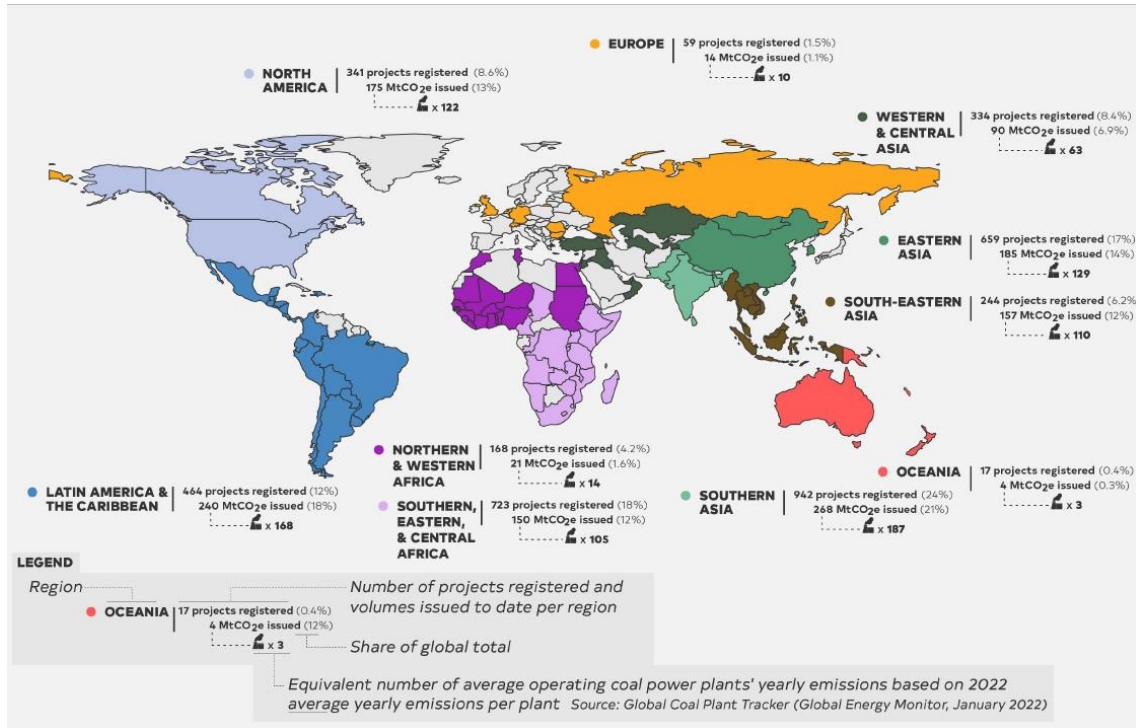


Ilustración 10: emisión de créditos en el MVC y proyectos registrados entre 2002-2022. Fuente: (Dyck, 2021)

Por países, los tres líderes por emisiones de créditos de carbono son Estados Unidos, China, y la India. El asunto de la disponibilidad geográfica de los créditos de carbono se tratará de nuevo en la sección 2.1.3 *Importancia del MVC: ineficiencias y oportunidades del mercado*.

### 2.1.1 Créditos de carbono y metodología

Un crédito de carbono es una unidad negociable del MVC que representa una tonelada de emisiones de gases de efecto invernadero que se ha reducido, evitado, o extraído de la atmósfera (relativamente a un escenario base). Para permitir la comparabilidad entre créditos es necesario tener una unidad estándar. Por tanto, un crédito de carbono está directamente relacionado con la reducción o extracción de una tonelada de CO<sub>2</sub>e (habitualmente medido en toneladas, t, a veces en megatoneladas, Mt).

Los créditos de carbono del MVC son generados gracias a las actividades involucradas en los proyectos y programas que son certificados en base a los distintos estándares disponibles en el mercado, para después ser incluidos en los registros de carbono. Estos créditos pueden ser adquiridos por empresas, agentes individuales, u otras entidades que quieren compensar sus emisiones de GEI o que quieren contribuir a la reducción de emisiones de GEI. El precio de los créditos de carbono viene determinado por el tipo de actividades que conlleva un proyecto, así como por la calidad de este, y la demanda del mercado de créditos vinculados a dichas actividades.

Los créditos de carbono son distintos de los derechos de emisión de los sistemas de emisiones limitadas y negociables (*cap-and-trade systems*). Los derechos de emisión permiten emitir una determinada cantidad de gases a la atmósfera. Estos derechos son transferibles y están limitados por un regulador que define un límite superior que pueden ser emitidas por los participantes del sistema (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico del Gobierno de España, 2023).

Otra diferencia remarcable tiene que ver con el horizonte temporal de ambas denominaciones. Por un lado, los derechos de emisión tienen una perspectiva futura, ya que un ente obtiene unos derechos para emitir durante un año una cantidad determinada de GEI. Por el contrario, los créditos de carbono tienen un horizonte temporal que considera las emisiones secuestradas o evitadas en el pasado. De esta forma, el MVC incentiva a los agentes de los sectores público y privado a contribuir a la acción por el clima.

Según la consultora McKinsey & Co, los factores que impulsan la integridad medioambiental de los créditos de carbono son (McKisney & Co., 2023):

- **Permanencia:** periodo por el que se va a mantener el carbono secuestrado o evitado. A mayor permanencia, y a menor riesgo de reversión, se considera que los créditos tienen mayor calidad. Cada metodología (en función de cada estándar) tiene una permanencia esperada.
- **Adicionalidad:** la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> y su captura no ocurriría sin el proyecto de emisión de créditos de carbono.
- **Sin fugas:** los efectos negativos evitados (o positivos generados) por el proyecto no son simplemente revertidos en otro lugar y, por lo tanto, hay un efecto real (*no leakage*).



- **Monitorización, reporte, y verificación:** los créditos de carbono se emiten basados en mediciones de emisiones de CO<sub>2</sub> reales y precisas (o capturas), siguiendo procesos de validación y verificación robustas e independientes (terceras partes involucradas).
- **Premisas:** las premisas del impacto del proyecto con relación al escenario base son precisas y creíbles, y no recurren a sobreestimaciones que puedan llevar a un sobredimensionamiento de las emisiones de créditos, superiores al efecto real del proyecto.
- **Contabilidad única:** las emisiones de CO<sub>2</sub> o CDR no son contadas dos veces, o negociadas, o reclamadas por distintos agentes.
- **Sin daño neto:** no hay daños inintencionados sobre la biodiversidad, las comunidades locales, o el desarrollo sostenible en general.
- **Co-beneficios:** el proyecto genera beneficios positivos no relacionados con GEI, tales como preservar la biodiversidad y el desarrollo sostenible.

Para entender qué hace que un crédito tenga mayor calidad hay que profundizar en las características de este. Los créditos de carbono de alta calidad son el resultado de decisiones bien informadas tomadas durante el diseño y desarrollo del proyecto, siguiendo las directrices de las metodologías de los estándares de carbono, y en consonancia con la normativa en la que se emite el crédito.

Consecuentemente, hay una relación directa entre la calidad de un proyecto y la calidad de los créditos emitidos como resultados de sus actividades. Además, los compradores de esos créditos estarán dispuestos a pagar un mayor precio, dado el valor añadido y diferencial de esos créditos (i.e., beneficio reportado sobre la marca por la colaboración con comunidades locales).

Algunos rasgos característicos de proyectos que generan créditos de alta calidad son (Dyck, 2021):

- Alineación con políticas climáticas que no son todavía requerimientos legales. A través del mercado voluntario de carbono los agentes económicos pueden comprometerse con países que acogen proyectos de emisión de créditos de carbono distinto al de su sede social, así como cumplir con regulación más avanzada en materia climática en comparación con su regulación local.
- Salvaguardas que aumenten la protección sobre el medio ambiente y la comunidad local por encima incluso de los estándares mínimos requeridos.
- Reparto transparente y justo de los beneficios, asegurando que las comunidades locales se benefician de las actividades del mercado voluntario de carbono. Estos beneficios pueden darse en forma de pagos directos a las comunidades, mejora de la infraestructura, de servicios a la comunidad, o de otros beneficios no

monetarios (i.e., donación del cierto material empleado durante la actividad, o enseñanza de ciertas técnicas/destrezas).

Los precios de los créditos de carbono vienen determinados por los tipos y la calidad de las actividades del MVC, y la demanda de créditos de esas actividades. Factores que influyen en un precio más elevado son: menor antigüedad, obtener la certificación de un registro con mayor reputación (i.e., GS, VCS, ACR, CAR), estar vinculado a un proyecto de gobernanza reconocida, ofrecer mayores beneficios adicionales, tener algún tipo de tecnología integrada en el proyecto, o ser un proyecto de extracción de CO<sub>2</sub>.

Por el contrario, factores que influyen en un precio más bajo son: proyectos más antiguos, certificaciones de registros menos conocidos, dudas en la gobernanza del proyecto, cobeneficios limitados, proyectos basados en la naturaleza (necesitan desarrollo más largo), o ser proyectos de evasión de emisiones.

En noviembre de 2021, el precio por crédito de carbono podía variar desde unos pocos céntimos por MtCO<sub>2</sub>e hasta cientos de dólares estadounidenses por MtCO<sub>2</sub>e (Dyck, 2021). Estos precios están influenciados por las asimetrías de poder y la distinta capacidad de las partes para negociar. El mercado actual carece de la liquidez necesaria para que se produzca una comercialización eficiente de los créditos de carbono: existe demasiada heterogeneidad y hay una necesidad de desarrollo de contratos con términos estandarizados.

### 2.1.2 Funcionamiento del mercado

La negociación de un crédito de carbono es el último eslabón de un proceso complejo. Un proyecto del mercado voluntario de carbono se puede dividir en tres grandes fases con distintas etapas: la primera fase de planificación, la segunda de implementación, y la tercera de monetización<sup>9</sup>.

La **fase de planificación** comienza con una idea de proyecto, que tiene que someterse a un estudio de viabilidad, determinando la línea base de GEI. En este estudio se expone el escenario base, demostrando las emisiones que tendrían lugar de no llevarse a cabo el proyecto, frente a los objetivos de reducción/captura de emisiones como consecuencia de la implementación del proyecto. Con el diseño del proyecto, las partes interesadas llevan a cabo los trámites necesarios para obtener los permisos de las autoridades competentes, así como buscan la financiación necesaria para hacer del proyecto una realidad. Cuando estos pasos han sido completados, el proyecto es validado bajo un estándar de carbono y registrado.

La **fase de implementación** da comienzo con las primeras actividades del proyecto, y durante todo este periodo se lleva a cabo la verificación, certificación, y reconocimiento periódicos de unidades de GEI. Con la presentación del informe final del proyecto, se produce la verificación final de las reducciones/captura de emisiones por parte de una organización independiente al proyecto. Posteriormente, se reconocen las unidades de GEI derivadas del proyecto, y se procede a la certificación final de estas. En ese momento los créditos de carbono son emitidos y quedan registrados, estando disponibles para su negociación.

La **fase de monetización** puede realizarse en paralelo a la fase de implementación o después de ésta. En el caso del mercado al contado, la negociación de los créditos de carbono se llevará al concluir la fase de implementación, cuando los créditos serán adquiridos por inversores, empresas o gobiernos interesados en la reducción o compensación de su huella de carbono, o personas individuales. En el caso en el que esta fase se inicie en paralelo a la fase de implementación, los inversores y demás agentes podrán acceder a los créditos a través de opciones y otros instrumentos financieros.

En estas tres fases descritas intervienen múltiples agentes, que pueden agruparse en tres grandes categorías en función de su interés con relación al mercado voluntario de carbono (Dyck, 2021):

- **Oferta de créditos de carbono:** los desarrolladores de los proyectos diseñan e implementan las actividades registradas bajo los estándares de los certificadores, con el fin de generar los créditos de carbono. Para comenzar las actividades diseñadas, los desarrolladores deben obtener los permisos necesarios de la autoridad competente, cumplir los estándares acordados, y establecer sistemas de monitorización. Solamente cumpliendo estos pasos podrá ser posible la emisión y venta de créditos de carbono.

---

<sup>9</sup> Para más información acudir a la norma [ISO 14064-2:2019](#) sobre la especificación de los proyectos de gases de efecto invernadero (capítulo 5).

En este proceso, los desarrolladores podrán ponerse en contacto con inversores para conseguir financiación por avanzado, asociarse con comunidades locales u organizaciones civiles, o establecer relaciones con otros participantes del mercado. También cabe la posibilidad que los distintos gobiernos movilicen capital para financiar actividades del mercado voluntario de carbono

En el lado de la oferta también se encuentran los “agentes reguladores del mercado”, que en este caso son las organizaciones que gestionan los estándares de carbono. Estas organizaciones son, por lo general, de carácter internacional y no gubernamental. Son las encargadas de establecer los requerimientos que los proyectos deben satisfacer para generar créditos de carbono para negociar.

Los gobiernos pueden influenciar el MVC a través de regulación que incluya en dichos requerimientos ciertas salvaguardas o repartos determinados de beneficios.

Por último, las comunidades locales pueden ser en último término los tenedores de los derechos sobre una cierta explotación forestal o determinada tierra en la que se quiera desarrollar un proyecto. Como gestores de la tierra, las comunidades locales deben estar involucradas en el desarrollo del proyecto, así como en el reparto de los beneficios derivados del mismo.

- **Demanda de créditos de carbono:** la mayor parte de los usuarios finales de los créditos de carbono son empresas privadas que voluntariamente toman parte en actividades de mitigación de su impacto medioambiental, alineadas con sus objetivos climáticos.

Además de entes privados, gobiernos, organizaciones no gubernamentales, e individuales pueden adquirir créditos en el mercado voluntario de carbono. De esta forma, se pueden compensar emisiones de vuelos, eventos, y distintas actividades económicas. Estas actividades, productos, y servicios cuyas emisiones de gases de efecto invernadero han sido compensadas son los famosos *neutros en carbono* (*carbon neutral*).

- **Inversores e intermediarios:** operando con ambos grupos (oferta y demanda de créditos de carbono) a través de la inversión en proyectos y la compra de créditos de carbono. Los intermediarios del MVC son, por lo general, empresas que buscan un lucro a través de la intermediación o la gestión de fondos que gestionan portafolios de créditos de carbono.

A la vez que arriesgan su capital, los agentes de este grupo aseguran la estabilidad del mercado. Por lo general, son empresas privadas que financian a los desarrolladores de los proyectos. A cambio, se garantizan un número determinado de créditos (venta del producto final) o un precio determinado de los mismos (opciones sobre el producto final).

Todo esto queda resumido en la Ilustración 11:

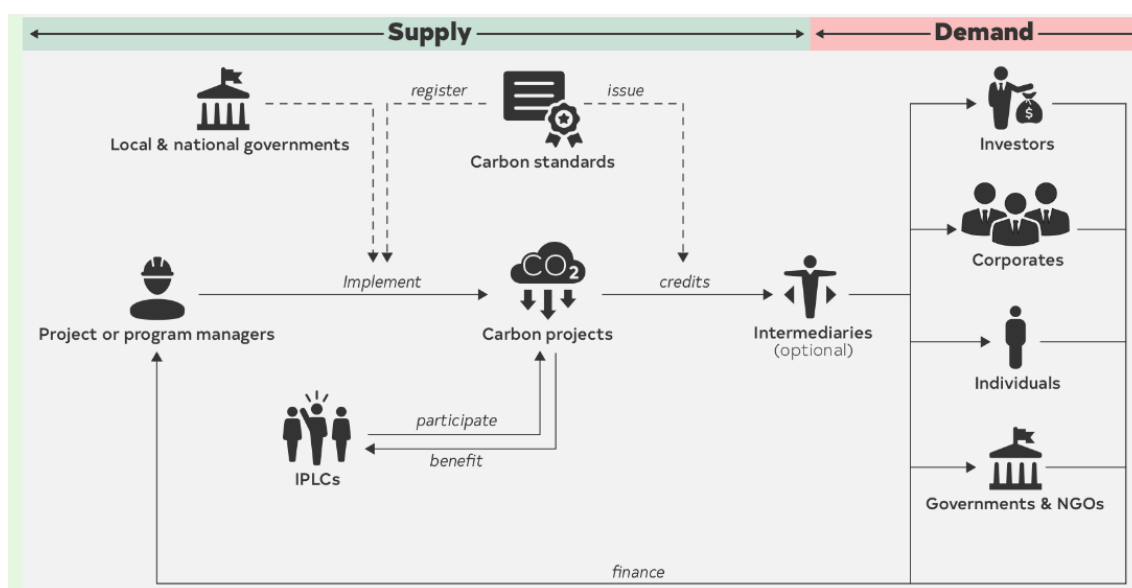


Ilustración 11: agentes y funcionamiento del MVC. Fuente: (Dyck, 2021).

Una pieza clave de información que enlaza a la oferta y a la demanda en el mercado es el precio de los créditos de carbono. Para los agentes en el lado de la oferta, es necesario tener una estimación sobre el precio que los créditos alcanzarán cuando sean emitidos, de tal forma que se garantice la viabilidad del proyecto.

Además, es importante saber en qué grado la *economía verde* podrá hacerse partícipe del proyecto y contribuir a su sostenibilidad económica. En el lado de la demanda, el precio de los créditos de carbono permite evaluar los costes que le supondrá a una empresa alcanzar sus objetivos climáticos.

En la actualidad, los precios del mercado voluntario de carbono no son transparentes, ya que no hay un mecanismo que establezca los precios y garantice cierto grado de transparencia. Consecuentemente créditos de carbono de distinto origen y calidad pueden tener distintos precios (desde céntimos a cientos de dólares estadounidenses). A medida que el mercado gane volumen y alcance un mayor grado de liquidez emergerán mecanismos más estables en lo que a establecimiento de precios se refiere. Como ya ocurrió antes en otros mercados, (i.e., mercado de deuda soberana) la mayor involucración de agentes (i.e., agentes especializados de negociación, agencias crediticias) traerá mayor transparencia al establecimiento de precios de los créditos de carbono.

La iniciativa TSVCM ya mencionada trabajó en esta dirección, buscando la armonización, eficiencia, y transparencia en el MVC. Según TSVCM, los factores que más impacto tienen a la hora de establecer el precio de un crédito son (Taskforce on Scaling Voluntary Carbon Markets, 2021):

- **Antigüedad:** los créditos más nuevos están mejor valorados que los créditos antiguos. El año en el que se emite un crédito determina su antigüedad. Por lo general, los compradores están dispuestos a pagar un precio mayor por créditos asociados a metodologías más recientes (i.e., soluciones basadas en la naturaleza que anteriormente no se contemplaban en el MVC). Además, y especialmente en países desarrollados, es más fácil determinar la *adicionalidad* en créditos más nuevos, ya que créditos de mayor antigüedad pueden referirse a emisiones reducidas o extraídas de actividades que ya no necesiten incentivos financieros del MVC.
- **Calidad:** créditos de mayor calidad tendrán un precio mayor. Por lo general, los proyectos de mayor calidad incurren en mayores costes de diseño, a la hora de implementar las actividades, llevar a cabo la monitorización, y verificar el impacto del proyecto. Además, proyectos de alta calidad suelen llevar asociados mayor impacto sobre las comunidades locales y sobre la biodiversidad, algo que debe ser reconocido en el precio de los créditos asociados al proyecto.
- **Certificaciones adicionales:** con relación a la calidad del proyecto, el valor añadido recién comentado puede ir acompañado de reconocimientos adicionales a la mera certificación otorgada por el registro (i.e., *SD VISTA*, *GS4GG*).
- **Poder de negociación:** como en todo mercado, aquellos agentes con mayor cuota de mercado o mayor capacidad financiera podrán tener un mayor poder de negociación. De esta forma, dada la falta de transparencia y el carácter voluntario del mercado, distintos agentes tendrán poderes desiguales a la hora de adquirir créditos de carbono, influenciando en el precio al que adquirirán dichos productos financieros.
- **Distribución del riesgo:** el precio de los créditos de carbono depende de los riesgos de desarrollar el proyecto, desembolsar la inversión, y el rendimiento final del proyecto. Por lo general, a menor riesgo y mayor calidad de las medidas de reducción y extracción de emisiones de GEI mayor será el precio de los créditos de carbono.

Según el TSVCM, existen cinco posibles escenarios para el mercado de carbono para su crecimiento hasta el año 2030. En estas estimaciones, el precio medio del crédito de carbono oscila entre los 5 – 15 dólares para un mercado de entre 5 – 30 miles de millones de dólares, y 50 – 90 dólares para un mercado de 50 – 180 miles de millones de dólares. Esta última estimación va alineada con la necesidad de satisfacer la creciente demanda de créditos de carbono, lo que debería significar que el mercado voluntario de carbono actual debería multiplicarse al menos por quince de aquí a 2030, hasta alcanzar los 50.000 millones de dólares (Taskforce on Scaling Voluntary Carbon Markets, 2021).

Con relación al impacto positivo de este mercado, está claro que el ámbito medioambiental es la componente que más se beneficia. Sin embargo, es importante mencionar como proyectos vinculados al MVC pueden tener un considerable impacto

social positivo, a través de la involucración de comunidades locales de áreas rurales, en muchos casos localizadas en países aún en proceso de desarrollo.

Hoy en día, la mayor parte de la oferta de créditos de carbono se genera en países en vías de desarrollo, mientras que la mayor parte de la demanda proviene de los países desarrollados. A través del mercado voluntario de carbono y con una estrategia de gobernanza de calidad se puede conseguir una redistribución parcial de la riqueza, dirigiendo flujos de capital desde los países más desarrollados hacia países en situación de desarrollo.

### 2.1.3 Importancia del MVC: ineficiencias y oportunidades del mercado

Para alcanzar el objetivo de reducir el calentamiento del Planeta a 1,5°C se debe emitir un máximo de 570 gigatoneladas (Gt) de CO<sub>2</sub> de forma acumulada en el intervalo 2018-2050 (Taskforce on Scaling Voluntary Carbon Markets, 2021). Este objetivo requiere que las emisiones netas de gases de efecto invernadero deben caer hasta las 23 gigatoneladas para el año 2030 (en el año 2021 se emitieron a nivel mundial 37,1 Gt de CO<sub>2</sub> a la atmósfera<sup>10</sup>).

Para conseguir esa reducción hasta las 23 Gt, al menos 2 Gt deberán garantizarse gracias a técnicas de captura y extracción. Hoy en día, hay suficiente *oferta potencial*<sup>11</sup> para cubrir esta necesidad, ya que hay unas 3 Gt de secuestro vía soluciones basadas en la naturaleza (i.e., reforestación) y entre 1-3,5 Gt que se cubrirían con tecnología basada en la extracción de CO<sub>2</sub> de la atmósfera (Taskforce on Scaling Voluntary Carbon Markets, 2021). Estas cifras se traducen en que el volumen del mercado voluntario de carbono actual debería multiplicarse por quince (en comparación con datos de 2019).

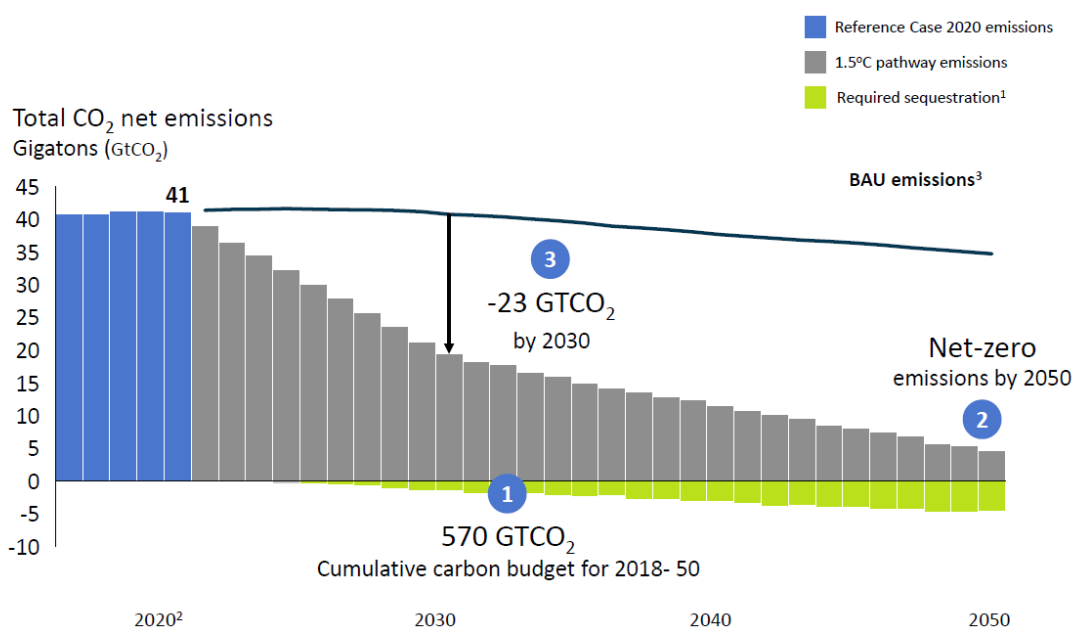


Ilustración 12: evolución de las emisiones para conseguir el objetivo de 1,5°C. Fuente: (Taskforce on Scaling Voluntary Carbon Markets, 2021).

De esta forma, queda demostrado que una de las principales fortalezas del mercado voluntario de carbono es su idoneidad para ser parte de la solución a un problema importante y que afecta a toda la humanidad: reducir el calentamiento del Planeta a 1,5°C.

Otra de las fortalezas del mercado voluntario de carbono reside en la posibilidad de compensar el daño medioambiental a través de un crédito de carbono adquirido a un precio inferior al coste de eliminar o reducir la fuente original del daño. En este punto no

<sup>10</sup> Para más información, visitar página web de *Our World in data*: [aquí](#).

<sup>11</sup> Oferta potencial puesto que su implementación está sujeta a la capacidad de los desarrolladores de los proyectos de movilizar capital inversor.



hay un consenso en el mercado, ya que se puede abogar que, de seguir esta tendencia, nunca se reducirán las emisiones netas. Es por esta razón que algunos autores consideran este aspecto como una debilidad más que una fortaleza.

Por el contrario, es cierto que las compensaciones pueden tener un rol complementario a la hora de acelerar la acción climática, incrementando la liquidez del mercado en el momento de mayor crecimiento esperado, y dando estabilidad al propio mercado.

Además, la compensación del carbono tiene la ventaja adicional de que los créditos de carbono verificados pueden canalizar la financiación hacia comunidades y proyectos que más la necesitan, lo que ofrece a los compradores una narrativa convincente de responsabilidad social que promover.

Por contraposición, al considerar las debilidades del mercado se puede diferenciar entre aquellas relacionadas con la propia definición del mercado frente a las debilidades de su funcionamiento.

Como se comentó anteriormente, la cuarta recomendación del TSVCM tiene que ver con el consenso sobre la legitimidad de las compensaciones. Si las empresas pueden compensar las emisiones por un precio más barato de lo que les costaría reducir o eliminar las mismas en sus propias operaciones y cadenas de suministro, entonces las empresas pueden verse desincentivadas para tomar medidas climáticas. Además, es necesario considerar que, si las compensaciones no se hacen en el área geográfica en el que se registran las emisiones de CO<sub>2</sub>, el impacto medioambiental neto en esa región geográfica será negativo.

De esta forma, es necesario que haya un consenso de mercado sobre el rol que deben tener las compensaciones a la hora de establecer y conseguir los objetivos de emisiones cero (Taskforce on Scaling Voluntary Carbon Markets, 2021).

Observando el funcionamiento del mercado, uno de los grandes cuellos de botella reside en los procesos de validación, verificación, y registro de los proyectos. Se estima que agilizando esta etapa del ciclo de vida de un crédito de carbono se podría duplicar la velocidad de emisión de un crédito. Además, el retraso en la emisión de créditos debido a la espera necesaria para la verificación del proyecto se estima que supone un coste de 2.600 millones de dólares estadounidenses para los desarrolladores de proyectos. En cuanto al impacto medioambiental, de no solucionar esta deficiencia, se estima que este bloqueo previene la emisión de créditos proporcionales a la emisión de 4,8 gigatoneladas de carbono para el año 2030 (Beken, 2022).

Además de un problema de cuello de botella, el mercado voluntario de carbono también presenta una falta de liquidez, lo que deriva en que la financiación de los proyectos sea una barrera de entrada para nuevos agentes. Este problema es más importante para pequeños y medianos promotores de proyectos. Los principales métodos de financiación conllevan acuerdos de compraventa de futuros, así como el uso de fondos propios.

Otra debilidad del mercado tiene que ver con su propia estructura, principalmente con la captura neta de valor por parte de los intermediarios. Inversores e intermediarios como los agentes de cambio se hacen con un tercio del precio medio de un crédito. En el año 2021 esta cifra alcanzó los 650 millones de dólares estadounidenses (Beken, 2022).

Para garantizar el éxito de la emisión de créditos de carbono, es necesario que las reducciones y eliminaciones de gases de efecto invernadero asociadas a dichos créditos se midan de forma precisa y más conservadora que las emisiones originales. Esto conllevaría el uso de técnicas que, en la actualidad, no se encuentran a disposición de todos los promotores de proyectos, quienes se ven abocados a usar técnicas menos precisas.

El aumento de la eficiencia en determinadas etapas del ciclo de emisión de créditos puede conllevar una liberación de recursos actualmente asignados a dichas partes del proceso. Este hecho, ligado al aumento de la liquidez del mercado, puede derivar en el redireccionamiento de esos recursos liberados para un mayor fomento del uso de mejores técnicas de medición. En un medio plazo, un mayor uso de esas técnicas disminuiría el coste soportado por los desarrolladores de proyectos que las empleen, democratizando el acceso a dichas técnicas.

El MVC se rige por organismos privados de carbono que definen las reglas para la generación, supervisión y certificación de las reducciones y eliminaciones de gases de efecto invernadero. Esta característica intrínseca al mercado hace que el grado de fragmentación de este sea considerable, así como su complejidad.

Por otro lado, la falta de transparencia en los precios del mercado supone un reto para los compradores, principalmente a la hora de saber si están pagando un precio justo por los créditos. De igual forma, la falta de transparencia también supone un reto para los inversores involucrados en la financiación de los proyectos, con relación a la gestión del riesgo que asumen al financiar y trabajar en proyectos sin saber cuánto se pagará finalmente por los créditos de carbono financiados.

Volviendo a la distribución geográfica de la emisión de los créditos de carbono (Ilustración 10), se puede apreciar cómo hay ciertas regiones con una disponibilidad limitada de proyectos. Debido a la desigual disponibilidad de recursos (i.e., financiación, personal cualificado) y de infraestructura, así como a la distinta regulación local, algunas empresas ven limitadas sus opciones de acceder al mercado voluntario de carbono. Esta ineficiencia del mercado es a su vez una oportunidad para su escalabilidad a nivel mundial.

Todas las ineficiencias listadas en esta sección pueden ser convertidas en oportunidades para el mercado gracias al uso de la tecnología, con el fin de hacer el mercado voluntario de carbono más transparente y responsable. A través de la combinación de tecnologías disruptivas como inteligencia artificial, *machine learning*, y el *internet de las cosas (IoT)*, se puede mejorar la calidad de la monitorización de los proyectos, obteniendo información de mayor calidad y asegurando créditos emitidos alineados con la mejora esperada respecto a sus escenarios base.

Además, tecnologías como *blockchain* y técnicas de *big data* pueden ayudar a hacer más transparentes las transacciones del mercado, ofreciendo mayor claridad a los agentes del mercado. La combinación de estas palancas de cambio impulsará la escalabilidad del mercado voluntario de carbono.

## 2.2 Propuestas para escalar el Mercado Voluntario de Carbono

El mundo necesita que se actúe ahora para evitar una catástrofe climática, dando una respuesta conjunta ante un problema global. Entre las prioridades de esta transición de nuestro modelo económico, las empresas deben ser conscientes de su impacto sobre el medioambiente y la sociedad, considerando por tanto una reducción de su huella de carbono, así como la compensación de aquella parte de las emisiones que no puedan reducir.

Ante la problemática para escalar el mercado voluntario de carbono, el conjunto de las más de cincuenta organizaciones que componen el TSVCM propuso seis ejes de acción, considerando la oferta y los estándares, los intermediarios del mercado, así como la demanda. Estas seis líneas son (Taskforce on Scaling Voluntary Carbon Markets, 2021):

1. **Principios básicos del carbono y taxonomía de los atributos:** para garantizar créditos que salvaguarden la integridad del mercado es necesario consensuar unos principios comunes a todos los agentes involucrados. Además de unos principios, es necesario consensuar la taxonomía de los atributos que permitan desarrollar los contratos de referencia.
2. **Contratos de carbono de referencia:** que garanticen una señalización transparente de del precio de los créditos, lo que consecuentemente llevará a desarrollar la gestión de riesgos y la financiación de la cadena de suministros.
3. **Infraestructura del mercado:** desarrollo de una infraestructura robusta de negociación, liquidación y registro que permita escalar el mercado, haciéndolo más transparente, y generando información de referencia.
4. **Consenso sobre la legitimidad de las compensaciones:** alineación de las distintas visiones de los agentes del mercado en el rol que pueden tener las compensaciones en los objetivos de neutralidad (*net-zero targets*).
5. **Integridad del mercado:** procesos robustos que aseguren un mercado justo, eficiente, transparente, y que reduzca el riesgo de fraude, ayudando a implementar el Acuerdo de París, y estableciendo un marco legal estable que apoye a los agentes del mercado.
6. **Señalización de la demanda:** simplificación de la experiencia de compra de créditos de carbono, reducción de barreras de entrada apalancándose en la digitalización del mercado, y guía al inversor sobre cómo usar este producto financiero.

Para dar respuesta a este ambicioso reto, todas las tecnologías existentes deben ser consideradas, al igual que se debe fomentar el desarrollo de nuevas soluciones que den una respuesta holística al problema. En el proceso de desarrollo de esas respuestas innovadoras la colaboración entre distintos agentes del mercado marcará la clave del éxito.

Como ha ocurrido en otros ámbitos, la digitalización y automatización de procesos ha logrado la escalabilidad de diversos mercados a lo largo de la historia (i.e., sector automovilístico tras la digitalización y automatización de las plantas de montaje de automóviles).

Una apuesta por la digitalización del mercado es la de Gold Standard, quien a través de su solución DLT pretende proporcionar mayor integridad al mercado, facilitar la negociación de los créditos de carbono, resolver el problema de la doble contabilidad, así como reducir las fricciones del mercado actual. Un esquema de su propuesta se puede ver en la Ilustración 13.

Por otro lado, y en línea con facilitar el acceso al mercado de un mayor número de agentes, la tecnología blockchain puede servir como palanca impulsora de este cambio. Ejemplos de iniciativas que trabajan ya en esta línea son la organización [KlimaDAO](#) o la empresa [Thallo](#), abriendo el camino hacia la tokenización de los créditos de carbono. La inclusión de esta tecnología introduce en el mercado nuevos productos como los porfolios de créditos de carbono, lo que motiva el crecimiento del mercado secundario y el potencial para unificar los distintos mercados de carbono.

### 2.2.1 Digitalización de la medición, reporte, y verificación

Las recomendaciones del TSVCM pretenden, entre otros, impulsar un proceso de verificación más eficiente y rápido, para atajar uno de los principales cuellos de botella del mercado. Para ello, el grupo de trabajo recomienda a los agentes del mercado encargados de la medición, reporte, y verificación (MRV) que desarrollen soluciones apalancadas en nuevas tecnologías, permitiendo reducir tiempos de espera y costes a ambos lados del mercado.

Esta propuesta requiere de un protocolo compartido de datos que reciba la información necesaria para realizar un proyecto y proteja a la vez su integridad durante las distintas etapas del proceso, especialmente durante las transferencias críticas de información. Este protocolo debe garantizar la interoperabilidad entre agentes del mercado.

Como consecuencia, el sistema digital de medición, reporte, y verificación (dMRV) permitirá que las empresas de verificación puedan monitorizar los proyectos con mayor frecuencia, en lugar de hacerlo al final de un largo periodo de reporte. En términos prácticos, el objetivo es reducir la duración actual estimada en quince meses a aproximadamente seis semanas (Taskforce on Scaling Voluntary Carbon Markets, 2021).

En términos económicos, gracias a la escalabilidad de esta solución digital, la reducción en los plazos de los proyectos repercutirá positivamente en las finanzas de los proyectos, disminuyendo sus costes, y aumentando la frecuencia con la que emitirán créditos de carbono.

En último término, la implementación exitosa de este nuevo paradigma supondría establecer los cimientos de un seguimiento integral de un crédito a través de la cadena de valor, lo que aumentaría la trazabilidad de este y disiparía las dudas acerca de la integridad y credibilidad de algunos proyectos.

El TSVCM no prescribe el uso de ninguna tecnología en particular sino más bien una colaboración entre las distintas tecnologías existentes y que se encuentran en desarrollo, fomentando siempre un continuo proceso de prueba y mejora. Algunos ejemplos que da con el uso de imágenes de satélite, sensores digitales, inteligencia artificial, colaboración intra-mercado gracias a bases de datos libres, y tecnologías de contabilidad descentralizadas (*DLT*, en inglés).

Por último, el grupo de trabajo propone que el conocimiento humano no debe ser descartado, y que el juicio crítico y en persona de los agentes expertos debe ser siempre considerado como complemento a la información disponible a través del uso de la tecnología.

En esta línea, Gold Standard lanzó en 2022 su propuesta de *dMRV*, con el que pretende eliminar barreras para alcanzar la escalabilidad del mercado. Este proyecto digital se basa en la ya citada interoperabilidad y la facilitación del acceso al mercado, reduciendo las barreras de entrada.

El modelo planteado es de colaboración abierta y está apoyado por *Google* (a través de financiación por valor de un millón de dólares), contando con otros agentes del panorama global, como el Banco Mundial. El proceso es el siguiente:

1. El diseño del proyecto es digitalizado y se adapta a los requerimientos necesarios y a la metodología del tipo de proyecto.
2. A través de una aplicación (*SustainCERT*) el diseño recibe la certificación necesaria.
3. Una vez implementado, gracias al uso de sensores, imágenes de satélite y otras tecnologías, el proyecto es monitorizado, simplificando el proceso actual.
4. La verificación del proyecto se produce de forma automática gracias a la información recibida a través de la monitorización automática, apalancándose en tecnología blockchain.
5. Con todos los datos necesarios reportados a través de los pasos anteriores, una conexión directa con el registro permite la emisión automática de créditos de carbono, en un proceso transparente y dinámico.
6. Una vez los créditos son emitidos, la conexión al mercado mundial simplifica la búsqueda de compradores para dichos créditos, acercando la oferta y la demanda del mercado voluntario de carbono.

El proceso se puede observar en la Ilustración 13:

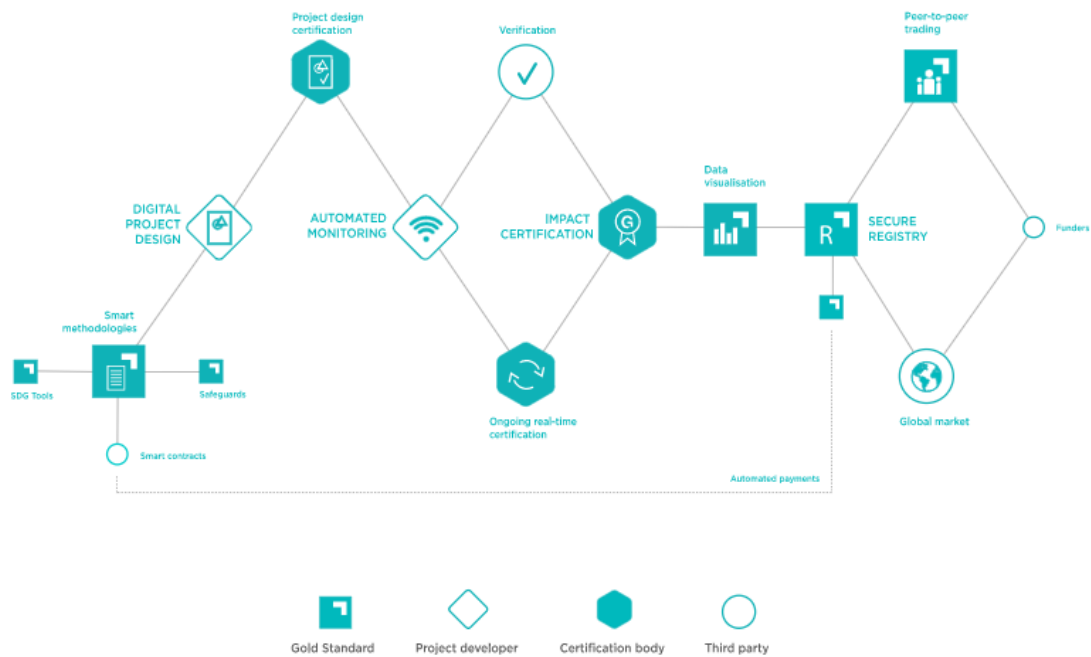


Ilustración 13: esquema del dMRV propuesto por Gold Standard. Fuente: (Gold Standard, 2022).

El impacto que espera generar Gold Standard con la implementación futura de su *dMRV* es de forma general, escalar el mercado voluntario de carbono a través del impacto en la interoperabilidad, el aumento de la eficiencia del usuario del *dMRV*, y nuevos estándares y modelos de gobernanza.

Además, este proyecto impactará positivamente en la integridad del mercado, a través de nuevas opciones digitales con las que tratar la seguridad de la información, el reporte, el seguimiento, y la tokenización de los créditos de carbono.

Por último, GS pretende generar un impacto positivo mejorando el acceso al mercado y a financiación a través de este nuevo sistema. Un efecto multiplicador será la generación

de modelos de negocio que permitirán canalizar la financiación hasta los desarrolladores de proyectos y comunidades locales.

Hasta este momento, la mayoría de las empresas presentadas en este trabajo están localizadas en Estados Unidos. Sin embargo, España también cuenta con emprendedores de éxito que están impulsando el crecimiento del mercado voluntario de carbono con su trabajo. *CO2 Revolution* es un ejemplo de ello. Iniciando en 2014 su actividad en Navarra, está centrada en soluciones basadas en la naturaleza, como la reforestación a través de especies autóctonas, a un bajo coste y con certificación oficial. Para ello, utiliza semillas pregerminadas que son lanzadas desde el aire por drones (CO2 Revolution, 2023).

En la primera fase de los proyectos, *CO2 Revolution* lleva a cabo un análisis de las variables que afectan a la creación de ecosistemas, y mediante el uso de algoritmos (*big data*) desarrollan la solución más adecuada para reconstruirlos. A la hora de reforestar, se utilizan semillas desarrolladas gracias al uso de la biotecnología. El proceso es optimizado gracias al uso de drones, lo que permite reforestar a bajo coste, lanzando más de 100.000 semillas en zonas de difícil acceso.

El objetivo final de *CO2 Revolution* es atraer financiación de empresas que quieren compensar su huella de carbono, a las que les ofrecen una estrategia de sostenibilidad. Son estas empresas las que adquiriendo créditos de carbono patrocinan la creación de nuevos bosques. Hasta el momento, se ha generado un paquete de bonos avalados por el Ministerio de Transición Ecológica del Gobierno de España con un volumen de 250.000 toneladas de CO<sub>2</sub> (Forbes, 2023).

Otra empresa española del sector es *Sylvestris*, quien tiene como objetivo restaurar zonas incendiadas con el uso de técnicas eficientes y de bajo impacto ambiental, ligado a la búsqueda de impacto social. Además, *Sylvestris* cuenta con el apoyo de *Fundación Repsol*, cuyo esfuerzo conjunto ha desarrollado la iniciativa *Motor Verde* (Sylvestris, 2023). Esta iniciativa contempla una herramienta de gran impacto, que permite calcular la huella de carbono tanto de una persona en función de sus hábitos, así como de actividades puntuales (i.e., eventos sociales) y contribuir a su compensación<sup>12</sup>.

La iniciativa *Motor Verde* cuenta con un factor innovador como es el uso de tecnología satelital para la monitorización y protección de los bosques. *Hispatat*, operador y proveedor de servicios por satélite español, se ha convertido en socio del *Grupo Sylvestris*, permitiendo monitorizar el crecimiento de los bosques y mejorar la calidad del reporte del volumen de carbono absorbido por los árboles (Sylvestris, 2023). Gracias al uso de esta nueva tecnología la certificación de créditos de carbono tendrá un mayor nivel de integridad. El uso del sistema *MRV* va ligado también a la integración en el terreno de tecnología *IoT* (sensores de alta precisión), impulsado por el uso de técnicas de *big data* e inteligencia artificial. Por último, el hecho de que el uso de tecnología satelital facilite la monitorización de las emisiones cercanas a un bosque permite que se facilite la prevención de incendios. Esta medida innovadora permite asegurar la integridad de los créditos de carbono, ya que garantiza en mayor medida el factor de *permanencia* asociado a los créditos.

---

<sup>12</sup> Calcular huella de carbono anual: [aquí](#).

### 2.2.2 El potencial de *blockchain* en el Mercado Voluntario de Carbono

*Blockchain* es una tecnología en auge habitualmente ligada en noticias de prensa a las criptomonedas, lo que ha mermado su popularidad entre los lectores dados los recientes casos de estafas. Sin embargo, *blockchain* es una herramienta con un gran potencial todavía por explotar. En el caso del mercado voluntario de carbono, esta tecnología puede cambiar las reglas actuales de juego, ofreciendo soluciones para solventar los actuales puntos de fricción: acelerar el proceso de verificación, romper barreras de entradas al mercado, reducir los excesivos márgenes de los intermediarios, simplificar las transacciones, y prevenir situaciones de fraude o estafa.

El *Protocolo Toucan* es un proyecto basado en tecnología *blockchain* que pretende democratizar el acceso a los mercados de carbono a través de la tokenización de los créditos de carbono. Una de las ventajas que presenta este proyecto para asegurar que el impacto neto del uso de esta tecnología sobre el medioambiente sea positivo, reside en el uso de procesos “*Proof of Stake*” (*PoS*), frente a los procesos “*Proof of Work*” (*PoW*) que usa *Bitcoin*. Estos últimos, consumen una gran cantidad de energía, ya que los ordenadores involucrados en el proceso compiten para resolver complicados problemas matemáticos.

Por el contrario, los procesos *PoS* cuentan con creadores de bloques en la cadena (llamados *validadores*) que son participantes que verifican la introducción de un nuevo bloque. Estos agentes tienen que ofrecer una cantidad determinada de criptomonedas como colateral, para incentivar la honestidad y penalizar los comportamientos indeseados. El proyecto más conocido y de mayor éxito que se basa en procesos *PoS* es *Ethereum*, segunda red *blockchain* más grande del mundo. *Ethereum* dejó de lado los procesos *PoW* para trabajar con *PoS*, reduciendo el consumo de energía<sup>13</sup> de su cadena de bloques en un 99,84% (De Vries, 2023).

Tokenizar significa “crear una representación digital de un activo en una cadena de bloques (*blockchain*)”, lo que se traduce en la digitalización de un certificado de titularidad registrado en un libro contable digital (*ledger*). De esta forma, tokenizar un crédito de carbono significa que su información y funcionalidades son trasladadas a la cadena de bloques, donde la unidad que representa un crédito de carbono se llama token (Khodai, Toucan Earth, 2022).

En el caso del *Protocolo Toucan*, una vez que un crédito de carbono ha sido tokenizado, éste se convierte en un *TCO2* (*Toucan carbon offsets*). Los *TCO2* son tokens ERC20<sup>14</sup> y son compatibles con la mayoría de los protocolos *DeFi* (Toucan Earth, 2023).

Sin embargo, este traslado se realiza cuando el crédito ya ha sido emitido, y posteriormente es incluido en la cadena. ¿Pero, y si la emisión de un crédito se englobara en un proceso que conllevara automáticamente la creación de los tokens asociados a dicho crédito?

---

<sup>13</sup> Ver índice de consumo de energía de *Ethereum* (Digiconomist, 2023).

<sup>14</sup> ERC20 es el nombre técnico de los tokens fungibles creados utilizando la *blockchain* de *Ethereum*.



En este caso no haría falta recurrir a los llamados *carbon bridges*, aquellos agentes intermediarios encargados de procesar la tokenización de créditos ya emitidos, mejorando en mayor medida el proceso de emisión de los créditos de carbono.

A estos créditos se les llamará “nativos en la cadena” (*native on-chain*). Una vez que los créditos son tokenizados, estos pueden ser vendidos, transferidos, o retirados, o pueden mantenerse en cuentas virtuales como un activo.

En este punto, el lector puede preguntarse acerca de la diferencia entre una criptomoneda y un token, ambos activos digitales. Las criptomonedas son los activos nativos de una red blockchain, mientras que los tokens son los activos creados como parte de una plataforma construida sobre una red blockchain (Analytics Insight, 2023). De esta forma, las criptomonedas son usadas como medio de cambio (en cierta medida también como depósito de valor) mientras que los tokens son activos de depósito de valor, que pueden ser intercambiados por criptomonedas.

Para terminar de entender el concepto de la tokenización de créditos de carbono, se hará una analogía con los famosos *non-fungible tokens (NFTs)*, conocidos en la actualidad gracias a su vinculación con obras de arte digital<sup>15</sup>.

Un activo se denomina como no fungible cuando éste tiene unas características o atributos únicos, de tal forma que no puede ser intercambiado por otro exactamente igual. En este sentido, una criptomoneda, al igual que un euro, es un activo fungible. Un token de un crédito de carbono se trataría de un activo no fungible, con unos atributos determinados (vinculados a las características del proyecto asociado) que definirían su utilidad, y respaldado por un activo en el mundo real. En contra posición, una obra de arte NFT puede estar asociadas a un activo real, pero no es lo habitual, y su utilidad queda determinada por el artista.

La ventaja de los activos digitales respaldados por un activo real, en el que su utilidad queda definida por sus atributos reales, es que las fluctuaciones en su precio tienden a ser menores. En concordancia, la naturaleza de las transacciones en las que se ven involucrados reduce el importante prejuicio existente en la sociedad actual relacionado con el carácter especulativo de este tipo de activos.

### 2.2.2.A Tokenización de créditos de carbono

Puesto que la introducción de la tecnología blockchain en el MVC tuvo lugar después de la creación del propio mercado, los créditos que fueron emitidos con anterioridad deben ser registrados en una cadena de bloques. Para ello, es necesario que existan unos intermediarios llamados *carbon bridges*. Por el contrario, y como se explicó anteriormente, aquellos créditos que son registrados en una cadena de bloques en el mismo momento de su emisión son parte del proceso de *tokenización nativa*.

La tokenización de créditos no nativos puede realizarse de forma *custodiada* o *no custodiada*. El primero de estos dos procesos conlleva la creación del token por parte de

---

<sup>15</sup> El primer museo NFT del mundo abrió en Seattle (Estados Unidos) en 2021 (Seattle NFT Museum, 2021).

un proveedor del servicio. Esto quiere decir que el registro y la emisión no se realiza de forma autónoma, y el crédito convencional (el real) emitido quedará custodiado por el proveedor del servicio, mientras que el token del crédito podrá ser negociado en la cadena de bloques. Por el contrario, el proceso no custodiado se lleva a cabo gracias a la conexión directa con la cadena de bloques, de tal forma que el registro y la emisión del crédito se realizan de forma autónoma. El crédito convencional queda bloqueado por el certificador y el crédito puede ser negociado en la cadena de bloques.

En ambos casos, a la hora de retirar un crédito de carbono se eliminará el token en la cadena de bloques. La diferencia entre la tokenización custodiada frente a la no custodiada tiene que ver con la dependencia de un tercer agente que tokeniza y registra los créditos, quien mantiene la responsabilidad de garantizar la transparencia de la red. Además, la existencia de este tercer agente puede crear fricciones en las operaciones de registro y negociación, por ejemplo, a la hora de emitir una orden de retirada de un crédito (como puede ocurrir en la actualidad con operaciones bancarias que necesitan supervisión humana).

Es por ello por lo que cuanto mayor grado de automatización alcance el proceso, menor probabilidad de error habrá, así como menor dependencia de la confianza en el certificador (Khodai, Toucan Earth, 2022).

Uno de los retos de la tokenización tiene que ver con evitar que el mercado alcance un alto grado de fragmentación, para que los créditos, ya sean nativos o no en una cadena de bloques, puedan ser interoperables.

Para dar respuesta a este reto, Gold Standard (segundo registro más grande a nivel mundial) lanzó a finales del año 2022 una consulta pública acerca de cómo se debía llevar a cabo la tokenización de créditos de carbono. Los participantes en esta consulta fueron 37 organizaciones, incluyendo institutos de investigación universitarios, organizaciones basadas en tecnología web<sup>3</sup><sup>16</sup> y desarrolladores de proyectos del mercado de carbono. La consulta se lanzó después de que Gold Standard actualizará los términos de uso de su registro en mayo de 2022, clarificando que la creación de tokens, criptomonedas u otros activos digitales de créditos no está permitida sin su expreso consentimiento (para créditos de carbono en su registro) (Gold Standard, 2023).

Tras el cierre de la consulta a finales de octubre del 2022, Gold Standard lanzó en marzo de 2023 la fase de estudio de las respuestas de la consulta, tras la cual decidirá si es necesario establecer una guía para la creación de activos digitales, algo que no está decidido todavía. Durante esta fase, el equipo de trabajo contará con la colaboración de empresas del entorno web3 como Toucan, Flowcarbon, Thallo, Earthchain, y Bitgreen, algunas ya mencionadas en este trabajo.

El contenido de la consulta englobó ocho categorías relacionadas con las áreas en las que Gold Standard está considerando aplicar condiciones en su metodología (Gold Standard, 2023). Estas áreas son:

---

<sup>16</sup> Web3 consiste en una serie de aplicaciones de libre acceso, descentralizadas e interconectadas potenciadas por arquitectura computacional blockchain (Ehrlich, 2023).

- 1. Modelo:** el modelo usado para crear y gestionar tokens digitales que representen créditos de Gold Standard.

La propuesta parte de un modelo blockchain de registro custodiado dentro del propio registro actual de GS. De esta forma, las organizaciones que quieran crear tokens digitales de créditos del registro de GS deberán abrir una cuenta de custodia, donde se almacenarán los créditos durante el tiempo en el que esté vigente su token digital. Gold Standard también está explorando la creación de una API (*Application Programming Interface*) que permita la comunicación bidireccional y automática entre el registro y plataformas de terceras partes, de tal forma que los tokens emitidos bajo esta infraestructura se englobaran en la familia de la *tokenización nativa*.

- 2. Posesión y retirada:** requerimientos relacionados con la información asociada con los tokens digitales que representen créditos de Gold Standard, la retirada de créditos del registro, y el reporte a cargo de la organización responsable de la creación de créditos digitales.

La propuesta pretende asegurar que los certificados retirados o cancelados totalmente por una plataforma tercera deben ser irreversiblemente retirados del registro de Gold Standard sin ninguna demora. Además, se quiere dar la opción de “des-tokenizar” los certificados si las entidades lo desean. También se pretende que las plataformas reporten de forma al menos cuatrimestral a GS de los certificados tokenizados, a la vez que se pretende introducir el concepto de fraccionamiento de tokens (i.e., representaciones de equivalentes de dióxido de carbono de 50 o 500 kilogramos).

- 3. Pooling:** limitaciones relacionadas con los créditos que se pueden agrupar con créditos de Gold Standard.

La propuesta pretende agrupar aquellos créditos de carbono que cumplan ciertos criterios de elegibilidad y que sean representados por un token genérico en lugar de por diversos tokens que sean específicos para cada crédito individual. La propuesta partía de la hipótesis de que mientras esta agrupación de créditos puede ser ventajosa para facilitar el acceso a liquidez de muchos desarrolladores de proyectos, por otro lado, las implicaciones relacionadas con el precio del *pool* podrían ser desfavorables para un importante número de proyectos registrados en GS (aquellos que ya son capaces de vender créditos a mayores precios).

- 4. Due Diligence:** requerimientos de información como parte de las comprobaciones *Know Your Customer (KYC)* y de prevención de blanqueo de capitales (*AML, Anti-Money Laundering*, en inglés).

En la consulta se pretende preguntar a los grupos de interés si el *modus operandi* actual de GS es suficiente de cara a garantizar unas comprobaciones suficientes, y si estas garantías debían aumentar su nivel de exigencia una vez que se permitiera la tokenización de créditos registrados en GS.

- 5. Sostenibilidad:** requerimientos para asegurar que los tokens digitales que representen créditos de Gold Standard solamente se crean usando tecnologías blockchain de baja intensidad de carbono.

La propuesta plantea que las organizaciones que creen tokens digitales de créditos en el registro de GS deben o i) asegurar que esos tokens solo existen en cadenas de bloques que utilizan mecanismos de *proof-of-stake (PoS)*, o ii) que en aquellos casos en los que los mecanismos *PoS* no puedan ser usados, se provea de al menos un análisis comparativo e independiente que certifique que las emisiones directas de la tecnología blockchain utilizada sean menores que aquellas que usan mecanismos *proof-of-work (PoW)*.

**6. Seguridad de datos:** requerimientos para asegurar que las organizaciones toman las medidas adecuadas para protegerse de ataques informáticos que puedan poner en riesgo tokens digitales que representen créditos de Gold Standard.

La consulta pretendía buscar un consenso acerca de qué requerimiento y salvaguardas se deberían poner en práctica con relación a la seguridad de las tecnologías usadas por las organizaciones que puedan crear tokens digitales asociados a créditos de GS.

**7. Unidades permitidas:** restricciones iniciales y limitadas sobre los tipos de créditos que se pueden tokenizar.

La propuesta plantea prohibir la tokenización de dos tipos de créditos que actualmente se pueden registrar con GS. Estos son:

- a) *Planned Emission Reduction (PER)*: emitidos para ciertos usos de la tierra y para proyectos de silvicultura, y representan retiradas esperadas de emisiones futuras, en lugar de retiradas verificadas y exitosas de emisiones.
- b) *VERs* autorizadas para su uso bajo el Artículo 6 del Acuerdo de París: *VERs* asociadas con una carta de autorización emitida por el país que acoge el proyecto, permitiendo que los créditos sean usados por entidades en línea con los propósitos permitidos bajo el Artículo 6.

**8. Daño reputacional:** provisiones para proteger a Gold Standard, así como a sus proyectos de daños reputacionales.

La consulta pretendía recoger aquellas opiniones que promovieran un marco de responsabilidad más garantista que el que actualmente Gold Standard exige en sus términos generales y condiciones de uso del registro.

De forma general, todos los encuestados están de acuerdo con el hecho de que Gold Standard explore el uso de tecnología blockchain, destacando como su adopción puede ser un hecho que traiga ventajas relacionadas con la liquidez, la seguridad de la información, y la facilidad de acceso al mercado de carbono. Sin embargo, el grado de intensidad en la respuesta es distinto en función de si se trata de organizaciones de ese sector (quienes están totalmente a favor) o desarrolladores de proyectos (quienes subrayan que es necesario considerar la posible volatilidad del precio de los créditos, así como los riesgos reputacionales).

De forma más específica, las respuestas a cada una de las categorías anteriormente descritas pueden resumirse<sup>17</sup> en lo siguiente (Gold Standard, 2023):

---

<sup>17</sup> Para ver las respuestas específicas de un agente (KlimaDAO) hacer clic [aquí](#).

1. **Modelo:** la mayoría de los encuestados están de acuerdo con el modelo presentado, con una minoría que no ve necesario la creación de cuentas custodiadas, sino que prefieren un bloqueo de los propios créditos en el registro de GS de forma alternativa. Además, una mayoría también apuesta por la tokenización nativa como solución a largo plazo.
2. **Posesión y retirada:** mientras que la mayoría de encuestados están de acuerdo con la propuesta de GS de permitir la “des-tokenización”, algunos de ellos añadieron que es necesario aumentar las obligaciones a cumplir por terceras partes para evitar que se ahogue la innovación inicial. Además, una organización propuso la implementación del sistema de conexión vía API desde el lanzamiento del modelo de Gold Standard para evitar fallos humanos. Con relación a la frecuencia de retirada de las *reducciones voluntarias de emisiones*<sup>18</sup>, algunos encuestados dijeron que era suficiente si este proceso se llevaba a cabo en una semana, mientras que la mayoría se inclinaba por una retirada inmediata, gracias al uso de la tecnología. Todos los encuestados coincidieron en el potencial del fraccionamiento de los créditos.
3. **Pooling:** en esta categoría las respuestas fueron considerablemente diferentes, en función del grupo de interés. Por un lado, los desarrolladores de proyectos se mostraron cautelosos ante esta posibilidad de agrupar créditos, centrando sus argumentos en el alto riesgo reputacional que conllevaría agrupar créditos verificados por GS con aquellos créditos de otros registros. Por otro lado, los miembros de organizaciones de web3 demostraron mayor grado de aceptación, remarcando el hecho de que mayores restricciones para la agrupación de créditos solo obstaculizaría los beneficios propios de la tokenización.
4. **Due Diligence:** los encuestados coincidieron en que aquellas organizaciones que pretendan crear tokens digitales asociados a créditos registrados en GS deberían seguir el mismo escrutinio en materia de *KYC & AML* que se aplica a otros titulares de cuentas en el registro. Sin embargo, a la hora de preguntar por un nivel de exigencia adicional para los potenciales creadores de tokens digitales, la muestra de respuestas fue más heterogénea, desde aquellos que no consideraban necesario un aumento del nivel de exigencia, hasta aquellos que abogaban por exigir una *due diligence* a las partes que aportaran créditos o los quisieran “des-tokenizar”.
5. **Sostenibilidad:** todos los encuestados estuvieron de acuerdo con la propuesta, pero no con la forma de aplicarla. Mientras que algunos abogaron por prohibir el uso de mecanismos *PoW*, otros abogaban por limitar el uso de tecnología blockchain a aquella basada en mecanismos *PoS*, a la vez que otros defendían que GS debería estar abierto al uso de tecnologías con bajas emisiones como complemento a los mecanismos *PoS*.
6. **Seguridad de datos:** una minoría de los encuestados no consideró necesario que GS entrara a valorar este aspecto. Sin embargo, una mayoría dieron algunas recomendaciones como garantizar auditorías de seguridad llevadas a cabo por una

---

<sup>18</sup> VER, por sus siglas en inglés (*Verified Emission Reduction*).

tercera parte independiente (en lo relacionado a *contratos inteligentes*, plataformas de tokenización, y cómo estas plataformas interactúan con el registro de GS).

7. **Unidades permitidas:** por lo general, los encuestados se decantaron por permitir en mayor medida la tokenización de *PERs* frente a los *VERs*, aunque la mayoría de ellos estuvieron de acuerdo con la prohibición de estas unidades.
8. **Daño reputacional:** todas las partes involucradas en la consulta coincidieron en que las provisiones actuales de GS eran las necesarias y suficientes, con una voz proponiendo que GS creara un marco de “notificación y subsanación” para aquellos casos en los que las organizaciones consideraran que se hubiera producido un daño reputacional.

#### 2.2.2.B *Cómo puede beneficiarse el mercado voluntario de carbono de la tokenización de créditos*

En la actualidad, alrededor de mil millones de personas poseen una “cripto cartera”, participando en un mercado global valorado en 8.420 millones de dólares estadounidenses. Las estimaciones actuales hablan de una tasa de crecimiento anual compuesto del 24,8% entre 2023 y 2030 (Grand View Research, 2022). La tokenización de los créditos de carbono puede abrir las puertas del mercado voluntario a una gran cantidad de nuevos agentes, incrementando considerablemente el volumen de negocio.

La propia estructura del mercado voluntario de carbono limita el acceso a los créditos a aquellas partes que trabajan en colaboración con intermediarios, quienes aportan un valor añadido limitado. El uso de tecnología blockchain podría ser una palanca de **aumento de la eficiencia y la desintermediación**, o de una profesionalización de esa intermediación, de tal forma que verdaderamente sea una fuente de valor añadido (i.e., mantenimiento de la integridad de la cadena de bloques). Además, una consecuencia adicional de este cambio tiene que ver con el aumento del poder de negociación de los países en vías de desarrollo, quienes acogen una parte importante de proyectos de emisión de créditos de carbono<sup>19</sup>.

Por otro lado, la tokenización de los créditos permite crear mercados con **mayor liquidez**, lo que pretende aliviar lo que ha sido hasta ahora uno de los problemas del MVC. Como se ha explicado anteriormente, los tokens recogen los atributos de cada proyecto, creando tokens no fungibles. Gracias a esta característica, se pueden crear portafolios que combinen distintos tipos de tokens, generando mayor liquidez y ayudando a establecer un precio de referencia para cada tipo de activo. El *Protocolo Toucan* ha lanzado ya dos “fondos de carbono” (*carbon pools*) con tokens asociados. Cualquier persona que posea tokens asociados a determinados tipos de proyectos, pueden intercambiar dichos tokens por los correspondientes de estos fondos de carbono, los cuáles sí son fungibles y tienen una gran liquidez en el mercado. Un ejemplo de estos tokens fungibles es *NCT: Nature Carbon*

---

<sup>19</sup> Una investigación en 2022 demostró como un intermediario ofrecía créditos de carbono a un precio siete veces superior al pagado originalmente (Barrat & Sandler Clarke, 2022).

*Tonne*, un fondo que solo acepta tokens asociados a proyectos basados en la naturaleza con fecha de emisión en 2012 o más reciente (Khodai & X, Toucan Earth, 2022).

Otra de las ventajas que plantea la adopción de la tecnología blockchain tiene que ver con la **transparencia del mercado a la hora de determinar los precios** de los créditos de carbono. Todas las transacciones en la cadena de bloques quedan registradas y su información asociada es pública, en contraposición a la opacidad de las operaciones del mercado extrabursátil (*over-the-counter*). Como consecuencia de una mayor transparencia en el mercado, **el problema de la doble contabilidad** mencionado anteriormente también **se ve minorizado**.

Como se refleja en la Ilustración 11, la estructura actual del MVC hace que la certificación y emisión de un crédito de carbono no sea un proceso sencillo. A las palancas ya mencionadas en este apartado del proyecto, se suma la **mejora de la capacidad de financiación de los promotores** de los proyectos asociados a la emisión de créditos de carbono.

En la actualidad, la falta de visibilidad sobre el precio futuro al que se venderá un crédito de carbono cuyo proyecto se busca financiar, resulta en una limitada capacidad de negociación por parte del promotor del proyecto, quienes terminan cediendo parte del beneficio económico potencial al intermediario o financiador<sup>20</sup>. Gracias a la tokenización, la comercialización de preacuerdos de compra puede certificarse en el registro digital, generando información que ayude al establecimiento de precios a la señalización de la demanda.

En esta misma línea, gracias a la tokenización, los promotores de proyectos pueden ver como su capacidad de financiación también mejora fruto del cobro de cánones cada vez que sus créditos tokenizados son negociados en el mercado secundario. En el mercado convencional, una vez que un promotor vende un crédito de carbono, éste ya no se beneficia de cualquier apreciación del crédito. Gracias a estos cánones, se puede determinar un porcentaje del precio negociado que será transferido al promotor del proyecto tras cada negociación en el mercado secundario.

La última ventaja que se presenta en este apartado tiene que ver con el **fraccionamiento de los créditos de carbono**. Al igual que ocurre con otros activos reales de gran valor económico (i.e., bienes inmuebles), la tokenización permite fraccionar la posesión de un activo. En el caso de los créditos de carbono, permite dividir un crédito, es decir, permite crear tokens que representen partes menores a una tonelada métrica de carbono.

Esto permite abrir la puerta del mercado a promotores de proyectos cuyo impacto medioambiental sea menor al de una tonelada métrica, y asociarse con otros agentes para la emisión conjunta de créditos de carbono. Por el lado de la demanda, también resulta interesante, ya que aquellos compradores que quieran compensar volúmenes de emisiones menores a la tonelada métrica podrán adquirir el número de tokens que se ajusten a sus necesidades.

---

<sup>20</sup> “El aumento de la inversión en créditos de carbono beneficia a los intermediarios” (Hodgson, 2022).

### 2.2.2.C Tokenización hoy en día

En junio de 2023, existían 1.130 millones de créditos de carbono en el registro de Verra, habiendo sido retirados cerca de la mitad de estos. Del total de los créditos existentes, unos 25,4 millones de estos han sido tokenizados, mientras que solamente unos 581 mil créditos han sido tokenizados y retirados (KlimaDAO, 2023).

Esta diferencia entre la ratio de créditos retirados sobre créditos totales en el mundo real frente al mundo digital (50% vs 2,3%, respectivamente) demuestra el incipiente estado en el que se encuentra el mercado digital, ligado por tanto a un importante potencial de desarrollo.

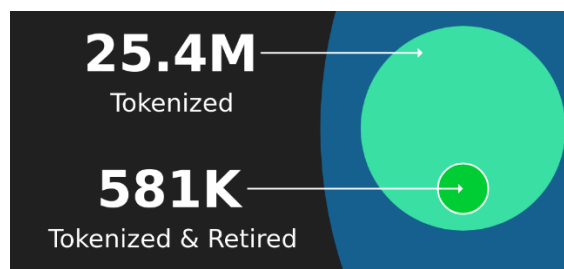


Ilustración 14: proporción de créditos retirados y tokenizados en el registro de Verra. Fuente: (KlimaDAO, 2023).

KlimaDAO es una organización autónoma descentralizada (OAD)<sup>21</sup> que trabaja con agentes tradicionales del mercado de carbono, plataformas cripto, empresas, y agentes individuales. Actualmente, KlimaDAO cuenta con cerca de 17 millones de activos de carbono, siendo el mayor tenedor individual de activos digitales de carbono.

Esta OAD nace con la intención de integrar el mercado de carbono en el mercado global, dado que, desde el punto de vista de KlimaDAO, “un mercado perfecto debería factorizar el impacto del carbono en el precio” (KlimaDAO, 2023). De esta forma, el mercado de carbono es considerado como una de las herramientas más poderosas y ya disponibles para contrarrestar el cambio climático a gran escala. Para ello, KlimaDAO permite a agentes individuales y organizaciones participar directamente en el mercado de carbono a través de su infraestructura y su token KLIMA.

El modelo de KlimaDAO se basa en una infraestructura blockchain pública y totalmente transparente, creando por primera vez las condiciones necesarias para escalar el mercado de carbono. De esta forma, los desarrolladores de proyectos pueden acceder a su infraestructura para encontrar contrapartes interesadas en sus créditos de carbono de forma inmediata.

Para aquellos que deseen adquirir créditos de carbono, KlimaDAO ofrece un mercado eficiente y seguro gracias al uso de herramientas Web3.

Por otro lado, para reclamar los beneficios medioambientales de cualquier crédito de carbono, la infraestructura de este mercado permite la retirada de créditos sin necesidad

<sup>21</sup> DAO, por sus siglas en inglés (*Decentralized Autonomous Organization*), es un tipo de entidad estructurada del nivel inferior al superior, sin una autoridad central. Los miembros de una DAO poseen tokens de ésta, son quienes votan las iniciativas de la entidad, y utilizan *smart contracts* (Investopedia, 2023).



de depender de intermediarios. Por último, y dada la naturaleza de una OAD, cualquier persona puede poseer tokens y participar directamente de la gobernanza del sistema.

Como ya se ha explicado en este trabajo, los tokens digitales de carbono representan una unidad verificada de carbono (VCU, por sus siglas en inglés) de un registro del mercado. El token *BCT* puede ser creado a través del *public bridge* del Protocolo Toucan, mientras que *MCO2* es un producto gestionado de forma centralizada por [Moss](#)<sup>22</sup>. Posteriormente los tokens de Moss son llevados a la cadena de bloques a través de su *private bridge*.

A día 23 de junio de 2023, el precio de los diferentes tokens del mercado digital de carbono era el siguiente (KlimaDAO, 2023):

	<b>Base Carbon Tonne (BCT)</b>	<b>Nature Carbon Tonne (NCT)</b>	<b>Moss Carbon Credit (MCO2)</b>	<b>Universal Basic Offset (UBO)</b>	<b>Nature Based Offset (NBO)</b>
<b>Dólar</b>	0,69 \$	1,65 \$	1,31 \$	0,96 \$	0,97 \$
<b>Euro</b>	0,63 €	1,51 €	1,20 €	0,88 €	0,89 €

Ilustración 15: Tipo de cambio tokens a dólar (EE. UU.) / euro. Fuente: elaboración propia con información de KlimaDAO.

KlimaDAO, además de tener su propio token (KLIMA), participa en el ecosistema de los créditos de carbono. Hoy en día, los tokens principales en la tesorería de KlimaDAO son *BCT*, *NCT*, *UBO*, *NBO*, y *MCO2*, y su flujo hacia la tesorería apuntala el crecimiento del protocolo (aumento de liquidez en el ecosistema). Su infraestructura está basada en procesos *Proof of Stake*, lo que permite que los usuarios del mercado sean recompensados por participar en las nuevas transacciones.

El ecosistema de KlimaDAO pretende maximizar la creación de valor para su comunidad a través de un círculo vicioso de crecimiento. La actividad dentro del ecosistema aumentará la oferta de KLIMA, ya que un nuevo KLIMA solo puede ser acuñado a través de la inclusión de una tonelada de carbono (como puede ser *BCT* u otro token) en la tesorería de KlimaDAO y retirándolo del mercado.

De esta forma, cuando se consiga la escalabilidad del ecosistema, el número de tokens en la tesorería (respaldados por KLIMA) será inversamente proporcional a la disponibilidad de créditos de carbono en el mercado tradicional de carbono. A través de la retirada de oferta de créditos en el mercado y bloqueándolos en la tesorería se interferirá en las condiciones de la demanda en los mercados tradicionales, incrementando el precio de los créditos de carbono y sus respectivos tokens.

<sup>22</sup> Proveedor de software y soluciones de carbono (*end-to-end*).

Hay dos claves para sustentar el sistema:

### 1. La tokenización de créditos de carbono: Protocolo Toucan

BCT (uno de los tokens utilizados por KlimaDAO) es un token que agrupa un pool créditos de carbono que representa un grupo de diferentes toneladas de carbono incluidas en una blockchain a través de TCO2.

Las características principales de los créditos que son llevados a la cadena de bloques cuando son transformados en un TCO2 son: el nombre del proyecto, número de serie, tipo de proyecto, año de antigüedad, y estándar de verificación.

Cada TCO2 puede representar una amplia variedad de créditos asociados a proyecto muy distintos entre sí. Sin embargo, la creación de un mercado digital de carbono requiere un grado de estandarización. Este es el sentido de los *pools* de carbono, de tal forma que cada TCO2 puede asociarse a un token como BCT, UBO, NCT, o NBO.

Por tanto, estos tokens son en realidad tokens de índices de créditos de carbono, basados en una gran variedad de proyectos del mercado voluntario de carbono (KlimaDAO, 2023).

### 2. Ecosistema KlimaDAO

El principio fundamental del ecosistema KlimaDAO reside en que un token KLIMA solo puede ser acuñado por el tesoro de la organización si al menos 1 tonelada de carbono de BCT (o similar) es depositada en su balance.

Puesto que cada BCT está cubierto por un crédito de carbono que garantiza la mitigación o extracción de una tonelada de carbono, el sistema está basado en la integración del carbono en el propio mercado. De esta forma, el valor de KLIMA está conectado al valor de BCT y demás tokens digitales depositados en la tesorería de KlimaDAO. En consecuencia, el valor de tokens y los créditos de carbono estarán sujetos a eventos del mercado.

El hecho de que el valor de los tokens esté sujeto a los acontecimientos del mercado está alineado con el objetivo principal de la organización, que no consiste en la búsqueda de un precio estable del carbono sino en crear la infraestructura y el ecosistema necesario para escalar el mercado voluntario de carbono. Será a través de las políticas y decisiones tomadas en la organización como el protocolo será moldeado para optimizar las distintas tendencias del mercado en el tiempo. Esto conlleva en un medio plazo la búsqueda de un equilibrio entre volatilidad frente a estabilidad y consistencia, objetivos principales de la DAO. Con la visión puesta en el año 2050, la organización anticipa mayor estabilidad para el mercado a la vez que KLIMA se acerca al equilibrio entre oferta y demanda en el mercado voluntario de carbono.

A través de una política estricta alineada con los principios recién expuestos, KlimaDAO debería conseguir sus objetivos a medio plazo como organización, entre los que se incluye i) la reducción de carbono, ii) el incentivo de la participación en los mercados de carbono, iii) y la construcción de una infraestructura que aumente la liquidez y transparencia en el mercado voluntario de carbono. La Ilustración 16 recoge la evolución durante los últimos dos años de los precios de los tokens mencionados en este trabajo.

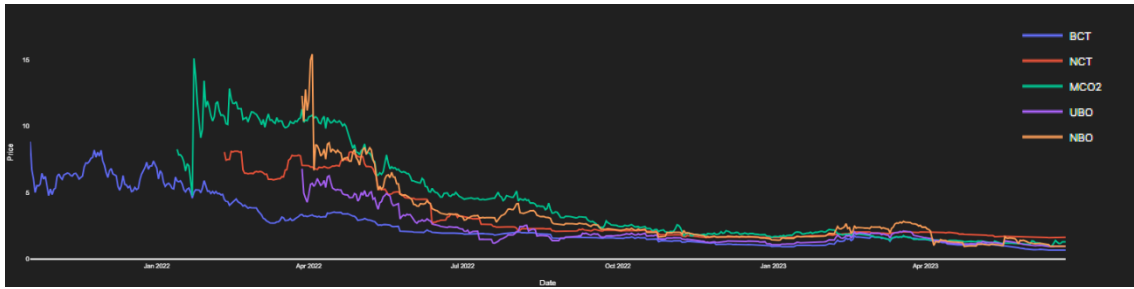


Ilustración 16: precios históricos de los tokens de carbono. Fuente: (KlimaDAO, 2023).

Desde un punto de vista más cercano al mundo empresarial, también existen ejemplos de iniciativas impulsando la tokenización del mercado. Una de ellas es la *start-up* tecnológica Thallo, quien pretende democratizar el acceso a créditos de carbono registrados en cadenas de bloques emitidos por certificadores de confianza a través de la creación de un *marketplace*. De esta forma, los créditos verificados pueden ser vendidos, mantenidos, o retirados libremente por otras empresas o personas individuales que quieran compensar su huella de carbono (Thallo, 2023).

En la actualidad, Thallo ofrece sus servicios tanto a promotores de proyectos que quieran emitir créditos de carbono, a empresas interesadas en la adquisición de créditos de carbono, así como a personas individuales que quieran negociar créditos de carbono. Para los promotores de proyectos, Thallo ha desarrollado una sencilla interfaz que pretende simplificar el proceso de incluir en la cadena de bloques sus créditos ya certificados. Además, los promotores pueden establecer el precio de sus créditos de carbono con información en tiempo real del mercado. Por último, Thallo garantiza unos cánones en forma de ingresos pasivos por las transacciones de esos créditos en el mercado secundario.

El modelo de tokenización que presenta esta empresa se sitúa en el ámbito de la *tokenización custodiada*. Como se explicó anteriormente, la empresa asegura que cada uno de los créditos tokenizados en el mundo digital está respaldado por un crédito de carbono en el mundo real, con las características y antigüedad grabadas en el token en el momento en el que se emite.

La arquitectura sobre la que se construye este modelo de negocio queda recogida en la Ilustración 17:

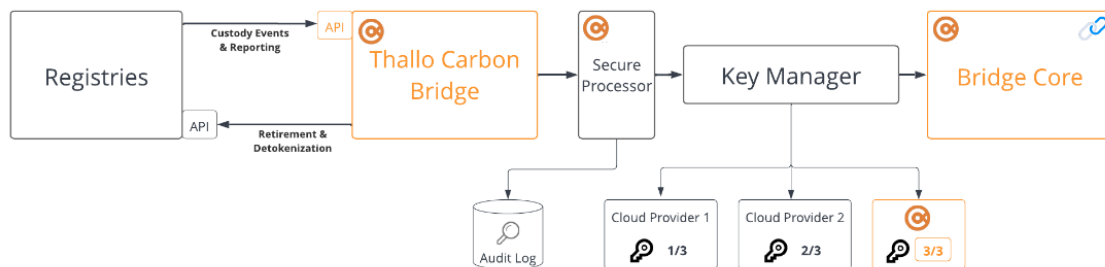


Ilustración 17: arquitectura del modelo de Thallo. Fuente: (Thallo, 2023)

En relación con la consulta de *Gold Standard*, el modelo de Thallo incluye ya una *API*, lo que permite la integración de su tecnología en las plataformas de los diferentes registros de carbono. Este hecho es un avance ya en la dirección en la que se encuentran las respuestas a la consulta de GS y recogida en este trabajo.

El modelo de Thallo permite un flujo bidireccional de los créditos de carbono (*two-way carbon bridge*), algo fundamental para mantener la integridad del mercado voluntario de carbono. De esta forma, se puede digitalizar e introducir los créditos en una cadena de bloques desde un registro, así como eliminarlos de la misma cadena, asegurando la transparencia y trazabilidad en todo momento (evitando caer en el problema de la doble contabilidad).

De forma similar a la práctica mencionada anteriormente llevada a cabo por KlimaDAO, Thallo recoge e introduce en la red blockchain la información acerca del tipo de proyecto, su antigüedad, su número de serie, entre otros detalles. Gracias a esta práctica, cualquier persona puede acceder a los datos de la cadena de bloques y consultar la información que desee acerca de los proyectos.

El conector de Thallo (*carbon bridge*) permite que la retirada de créditos se lleve a cabo desde la cadena de bloques, siendo también reflejada en el registro donde se encuentra depositado el crédito de carbono. Por tanto, el conector es un elemento aditivo al ecosistema existente, y el agente que retira el crédito se beneficia en tanto en cuanto tiene una doble prueba de la retirada: el certificado emitido por el registro, así como una prueba de retirada (*Proof-of-Retirement*) en formato de token no fungible (*NFT*). La representación gráfica del conector se puede ver en la Ilustración 18.

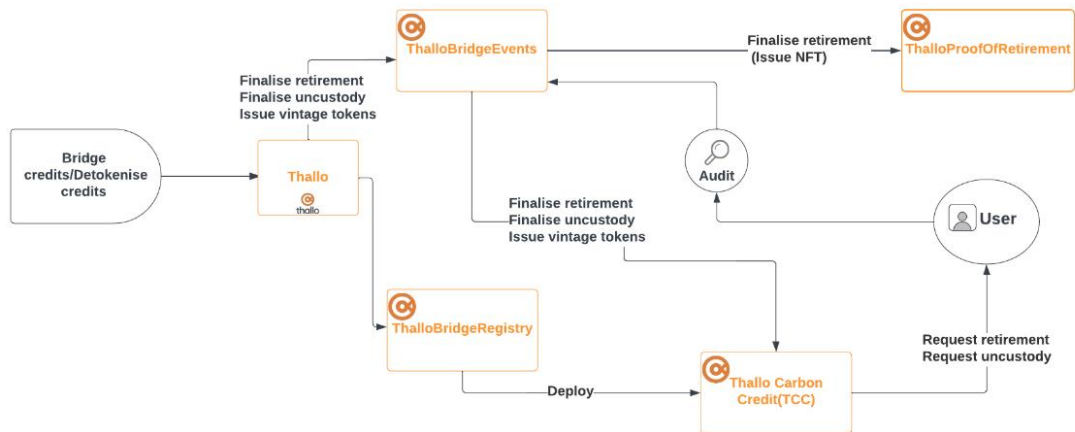


Ilustración 18: flujo del proceso de un Smart Contract. Fuente: (Thallo, 2023)

De forma análoga a la existencia de empresas españolas explorando la digitalización de la medición, el reporte, y la verificación, España es también cuna de empresas del mercado voluntario de carbono vinculadas a la tecnología blockchain. Es el caso de *Bank of Climate*, quien ha desarrollado una plataforma en la que negociar créditos de carbono basada en tecnología blockchain (Bank of Climate, 2023).

A través de esta iniciativa, los desarrolladores de proyectos pueden acceder a financiación de terceros, al igual que empresas o particulares interesados en la compensación de su huella de carbono pueden adquirir créditos del mercado voluntario de carbono. Por el momento, la *Bank of Climate* acepta proyectos de absorción (i.e., reforestación) de carbono, así como de reducción y mitigación (i.e., energías alternativas para el funcionamiento de una fábrica).

En línea con los argumentos expuestos en el trabajo en favor del uso de la tecnología blockchain, *Bank of Climate* pretende ofrecer al mercado mayor transparencia gracias al acceso a información precisa e íntegra, aumentar la eficiencia con una gestión ágil, y ofrecer un alto nivel de seguridad en las transacciones gracias al uso de blockchain, evitando el problema de la doble contabilidad y asegurando la titularidad de los créditos de carbono. Además, la plataforma pretende garantizar una interfaz de fácil uso, que ofrezca precios justos ofrecidos por los promotores sin el impacto de los intermediarios, sumado a una mayor sensación de fiabilidad gracias a la calificación de los créditos vía ratings (Bank of Climate, 2023).

### 3. Descripción del modelo desarrollado

A lo largo del capítulo 2, se ha demostrado como el mercado voluntario de carbono es una herramienta imprescindible para la lucha contra el cambio climático, así como un motor de cambio hacia un modelo económico que incluya en “sus precios” el impacto sobre el medio ambiente y las personas.

Una vez comprendido el funcionamiento actual de este mercado, de los agentes que intervienen, y las dinámicas que los vinculan, es momento de estudiar las diferentes propuestas para escalar dicho mercado recogidas en este trabajo.

En este capítulo se presenta y describe el modelo desarrollado, junto a la base de datos empleada. De igual forma, este capítulo recoge la implantación numérica del modelo, presentada en la Tabla 9. El análisis de resultados, así como las conclusiones, se tratan en los siguientes capítulos (4 y 5).

#### 3.1 Objetivos del modelo

La pregunta de estudio que pretende responder este proyecto se podría resumir en: *¿cómo se puede lograr la escalabilidad del mercado voluntario de carbono?* La respuesta cualitativa a esta pregunta ya se ha ofrecido en el capítulo 2. Atendiendo a un nivel mayor de profundidad y queriendo proporcionar una respuesta también de carácter cuantitativo, el modelo aquí presentado también responde a las preguntas:

- *¿Qué impacto tiene la digitalización de la medición, reporte, y verificación sobre la oferta y la demanda del mercado voluntario de carbono?*
- *¿Qué impacto tiene la inclusión de tecnología blockchain sobre la oferta y la demanda del mercado voluntario de carbono?*

Estas dos preguntas recogen dos propuestas que generan un impacto tanto en la oferta como en la demanda de este mercado. Además, y como consecuencia de ello, generan un impacto en los beneficios de los desarrolladores de proyectos, lo que puede y pretende desencadenar un cambio en las dinámicas del mercado. Así pues, redistribuyendo el reparto actual de beneficios por crédito de carbono y favoreciendo a los desarrolladores de proyectos en detrimento de intermediarios, se pretende desencadenar un círculo vicioso que aumente la creación de valor del mercado.

Por tanto, los objetivos del modelo son:

1. Demostrar cómo la digitalización de la medición, reporte, y verificación (*dMRV*) de los créditos de carbono conlleva una reducción del tiempo necesario en el proceso entre el origen y la emisión de un crédito de carbono y, por tanto, supone una reorganización de los recursos disponibles de los desarrolladores de proyectos.

Esta reorganización supondría un beneficio económico para los desarrolladores, debido a la posibilidad de situar sus créditos en el mercado de carbono en menor tiempo, lo que les supondría mayor velocidad de crecimiento.

La suma de estos efectos se traduce en una mayor capacidad de impactar en la oferta total del mercado, aumentando su poder de negociación en el precio final de los créditos de carbono.

2. Demostrar cómo la introducción de la tecnología blockchain en el proceso de emisión de créditos de carbono reporta un aumento del poder de negociación de los desarrolladores de proyectos.

La introducción de esta tecnología tendría un impacto económico a través de la reducción de las tasas impuestas por los intermediarios, reportando a su vez menor necesidad de acudir a inversores gracias a la liberación de cierto capital que actualmente termina en manos de los intermediarios.

Además, la posibilidad de emitir los créditos de forma digital (tokenización) reduciría los tiempos de emisión, aumentando el efecto del *dMRV*. Otra consecuencia de la adopción de esta tecnología es su impulso de la demanda de créditos de carbono, como consecuencia de la reducción de las barreras de entrada al mercado.

3. Demostrar que los beneficiarios de la implementación de estas tecnologías no solo serán los promotores de proyectos, sino distintos agentes del mercado que serán impactados en distinto orden de magnitud:
  - a. Comunidades locales: con una reorganización de la distribución de los créditos económicos, los desarrolladores de proyectos pueden aumentar los co-beneficios de sus actividades.
  - b. Inversores: gracias a una mayor señalización del precio y de la demanda, como consecuencia de una mayor integridad del mercado.
  - c. Intermediarios de valor añadido: organizaciones del sector web3 pueden ver como sus servicios son cada vez más requeridos, como consecuencia del aumento del volumen de negocio del mercado.
  - d. Sociedad en su conjunto: como consecuencia de una mayor transparencia en el mercado, que impulse todavía más el crecimiento de este. En último término, la mayor emisión de créditos de carbono permitirá generar un mayor impacto en el medio ambiente, repercutiendo positivamente en la sociedad.

### 3.2 Datos

La base de datos empleada en el desarrollo de este modelo se trata de una fuente de acceso libre desarrollada por el programa de investigación *Berkeley Carbon Trading Project* de la Universidad de California (So, Haya, & Elias, 2023). Esta base de datos contiene todos los proyectos del mercado voluntario de carbono registrados en los cuatro grandes registros a nivel mundial: *American Carbon Registry (ACR)*, *Climate Action Reserve (CAR)*, *Gold Standard (GS)*, y *Verified Carbon Standard (VCS)*.

En total, la base de datos contiene 7.933 proyectos, y la información que recoge sobre cada uno de ellos ha sido actualizada a día 10 de mayo de 2023. A su vez, la información recogida en la base de datos proviene principalmente de las bases de datos de los cuatro registros ya mencionado.

La base de datos está originalmente en inglés y, puesto que este trabajo se ha redactado en español, las referencias que se hagan a la base de datos serán traducciones del autor al español, a no ser que sean nombres de variables tal y como se han empleado en el modelo. Para leer información más detallada acerca de la base de datos se ha redactado el apéndice *7.2 Base de datos de Berkeley Carbon Trading Project*.

La estructura de la información extraída de la base de datos y más relevante para el desarrollo del modelo queda resumida en la siguiente tabla:

<b>Categoría</b>	<b>Datos</b>	<b>Descripción</b>
Identificación del proyecto.	ID del proyecto y nombre.	Permiten diferenciar todos los proyectos. Cada proyecto ocupa una fila del archivo.
Registro y estado	Registro voluntario que emite los créditos de carbono del proyecto y estado según su metodología.	Hay cuatro posibles valores para el registro: ACR, CAR, GOLD, y VCS. En cuanto al estado, valores semejantes, pero no iguales, debido a las distintas metodologías de cada registro.
Ámbito del proyecto.	Ámbito y tipo del proyecto.	Permite asignar posteriormente el precio de los créditos de carbono asociados al proyecto.
Créditos emitidos.	Evolución anual de los créditos emitidos en el periodo 1996 – 2023.	Permite estudiar las tendencias de oferta de créditos en el pasado, para estimar la oferta futura.
Créditos retirados.	Evolución anual de los créditos retirados en el periodo 1996 – 2023.	Permite estudiar las tendencias de demanda de créditos en el pasado, para estimar la demanda futura.
Créditos disponibles.	Evolución anual de los créditos disponibles en el periodo 1996 – 2023.	Permite estudiar el balance entre oferta y demanda del mercado.
Primer año del proyecto.	Año en el que un proyecto emite créditos por primera vez.	Permite estimar, en función del estado del proyecto, el patrón de emisión de un tipo de proyecto.

Tabla 1: información disponible en la base de datos empleada. Fuente: elaboración propia.



Antes de iniciar la formulación del modelo, se realizaron ciertos ajustes a la información extraída de la base de datos, con el fin de organizarla por categorías comparables a aquellas de las fuentes de referencia para el análisis de resultados.

Con el fin de poder asignar un precio de referencia a cada tipo de crédito de carbono, se denominó la variable “enlace tipo - precio”. Esta variable asigna según el ámbito y el tipo de proyecto un precio de referencia. El ámbito se refiere a nueve categorías, mientras que el tipo de proyecto engloba setenta y tres categorías. La variable se ha usado a modo de “llave primaria” para acceder de la Tabla 3 a la Tabla 2.

Por el lado de la información de referencia de los precios de los créditos de carbono, la fuente ofrece dieciocho tipos de proyectos, con el volumen vendido en unidades de megatoneladas de CO<sub>2</sub>, el precio medio, y el rango de precios. La información queda recogida en la Ilustración 19:

Project Type:	Volume Sold (MtCO <sub>2</sub> e):	Average Price:	Price Range:
Wind	12.8	\$1.9	\$0.3 - \$18
REDD+	11	\$3.3	\$0.8 - \$20+
Landfill methane	7.9	\$2	\$0.2 - \$19
Tree planting	3	\$7.5	\$2.2 - \$20+
Clean cookstoves	3	\$4.9	\$2 - \$20+
Run-of-river hydro	1.5	\$1.4	\$0.2 - \$8
Water/purification	1.2	\$3.8	\$1.7 - \$9
Improved forest management	0.8	\$9.6	\$2 - \$17.5
Biomass/biochar	0.7	\$3	\$0.9 - \$20+
Energy efficiency - industrial-focused	0.7	\$4.1	\$0.1 - \$20
Biogas	0.6	\$5.9	\$1 - \$20+
Energy efficiency - community-focused	0.6	\$9.4	\$3.3 - \$20+
Transportation	0.5	\$2.9	\$2.2 - \$6.8
Fuel switching	0.5	\$11.4	\$3.5 - \$20+
Solar	0.3	\$4.1	\$1 - \$9.8
Livestock methane	0.2	\$7	\$4 - \$20+
Geothermal	0.1	\$4	\$2.5 - \$8
Agro-forestry	0.1	\$9.9	\$9 - \$11

Ilustración 19: precio de los créditos de carbono según su tipo. Fuente: (Opanda, 2023).

Para mayor nivel de granularidad y precisión, el autor reescribió los datos de la Ilustración 19, calculando el peso de cada extremo del intervalo de precios necesario para obtener la media ofrecida en dicha ilustración.

Además, puesto que el nivel de granularidad de la base de datos que recoge los créditos de carbono es mayor en lo que a tipo de proyecto se refiere, se calculó una media para tecnologías de energía renovable no recogidas en la Ilustración 19. Para ello, se tuvieron en cuenta los pesos calculados y descritos en el párrafo anterior. El nombre del valor de la variable “enlace tipo - precio” es *RE bundle*.

Por último, y dada la dificultad para asignar valores a ciertos tipos de proyectos muy poco frecuentes, se denominó el valor “AVERAGE” que supone una media de los precios de todas las demás categorías.

La información queda recogida en la Tabla 2:

<b>Tipo de proyecto</b>	<b>Precio medio (\$)</b>	<b>Precio mínimo (\$)</b>	<b>Precio máximo (\$)</b>	<b>Peso precio mín.</b>	<b>Peso precio máx.</b>
Agro-forestry	9.90	9.00	11.00	55%	45%
Biogas	5.90	1.00	20.00	74%	26%
Biomass/biochar	3.00	0.90	20.00	89%	11%
Clean cookstoves	4.90	2.00	20.00	84%	16%
E.E. - Community	9.40	3.30	20.00	63%	37%
E.E. - Industrial	4.10	0.10	20.00	80%	20%
Fuel switching	11.40	3.50	20.00	52%	48%
Geothermal	4.00	2.50	8.00	73%	27%
Improved forest management	9.60	2.00	17.50	51%	49%
Landfill methane	2.00	0.20	19.00	90%	10%
Livestock methane	7.00	4.00	20.00	81%	19%
REDD+	3.30	0.80	20.00	87%	13%
Run-of-river hydro	1.40	0.20	8.00	85%	15%
Solar	4.10	1.00	9.80	65%	35%
Transportation	2.90	2.20	6.80	85%	15%
Tree planting	7.50	2.20	20.00	70%	30%
Water/purification	2.80	1.70	9.00	85%	15%
Wind	1.90	0.30	18.00	91%	9%
RE bundle	3.66	0.98	13.97	79%	21%
AVERAGE	5.45	2.05	15.95	76%	24%

Tabla 2: precio de los créditos de carbono según su tipo. Fuente: elaboración propia.

La asignación de valores a la variable “enlace tipo - precio” queda recogida en la Tabla 3<sup>23</sup>:

<b>Ámbito del proyecto</b>	<b>Tipo de proyecto</b>	<b>Enlace tipo - precio</b>
Agriculture	Bundled Compost Production and Soil Application	Agro-forestry
Agriculture	Compost Addition to Rangeland	Agro-forestry
Agriculture	Feed Additives	Agro-forestry
Agriculture	Improved Irrigation Management	Agro-forestry
Agriculture	Manure Methane Digester	Agro-forestry
Agriculture	Nitrogen Management	Agro-forestry

<sup>23</sup> E.E. se ha utilizado como denominación de “Energy efficiency”.

Agriculture	Rice Emission Reductions	Agro-forestry
Agriculture	Solid Waste Separation	Agro-forestry
Agriculture	Sustainable Agriculture	Agro-forestry
Carbon Capture & Storage	Carbon Capture & Enhanced Oil Recovery	AVERAGE
Carbon Capture & Storage	Carbon Capture in Cement	AVERAGE
Carbon Capture & Storage	Carbon Capture in Plastic	AVERAGE
Chemical Processes	Advanced Refrigerants	AVERAGE
Chemical Processes	HFC Refrigerant Reclamation	AVERAGE
Chemical Processes	HFC Replacement in Foam Production	AVERAGE
Chemical Processes	HFC23 Destruction	AVERAGE
Chemical Processes	N <sub>2</sub> O Destruction in Adipic Acid Production	AVERAGE
Chemical Processes	N <sub>2</sub> O Destruction in Nitric Acid Production	AVERAGE
Chemical Processes	Ozone Depleting Substances Recovery & Destruction	AVERAGE
Chemical Processes	Propylene Oxide Production	AVERAGE
Chemical Processes	Refrigerant Leak Detection	AVERAGE
Chemical Processes	SF <sub>6</sub> Replacement	AVERAGE
Forestry & Land Use	Afforestation/Reforestation	Tree planting
Forestry & Land Use	Avoided Forest Conversion	Improved forest management
Forestry & Land Use	Avoided Grassland Conversion	Improved forest management
Forestry & Land Use	Improved Forest Management	Improved forest management
Forestry & Land Use	REDD+	REDD+
Forestry & Land Use	Sustainable Grassland Management	Improved forest management
Forestry & Land Use	Wetland Restoration	Tree planting
Household & Community	Biodigesters	Biomass/biochar
Household & Community	Bundled Energy Efficiency	E.E. - Community
Household & Community	Clean Water	Water/purification
Household & Community	Community Boreholes	E.E. - Community
Household & Community	Cookstoves	Clean cookstoves
Household & Community	Energy Efficiency	E.E. - Community

Household & Community	Lighting	E.E. - Community
Household & Community	Weatherization	E.E. - Community
Industrial & Commercial	Aluminum Smelters Emission Reductions	E.E. - Industrial
Industrial & Commercial	Brick Manufacturing Emission Reductions	E.E. - Industrial
Industrial & Commercial	Carbon-Absorbing Concrete	E.E. - Industrial
Industrial & Commercial	Energy Efficiency	E.E. - Industrial
Industrial & Commercial	Fuel Switching	Fuel switching
Industrial & Commercial	Grid Expansion & Mini-Grids	E.E. - Industrial
Industrial & Commercial	Leak Detection & Repair in Gas Systems	E.E. - Industrial
Industrial & Commercial	Mine Methane Capture	E.E. - Industrial
Industrial & Commercial	Natural Gas Electricity Generation	E.E. - Industrial
Industrial & Commercial	Oil Recycling	E.E. - Industrial
Industrial & Commercial	Pneumatic Retrofit	E.E. - Industrial
Industrial & Commercial	University Campus Emission Reductions	E.E. - Industrial
Industrial & Commercial	Waste Gas Recovery	E.E. - Industrial
Industrial & Commercial	Waste Heat Recovery	E.E. - Industrial
Renewable Energy	Biomass	Biomass/biochar
Renewable Energy	Geothermal	Geothermal
Renewable Energy	Hydropower	Run-of-river hydro
Renewable Energy	RE Bundled	RE bundle
Renewable Energy	Solar - Centralized	Solar
Renewable Energy	Solar - Distributed	Solar
Renewable Energy	Solar Lighting	Solar
Renewable Energy	Solar Water Heaters	Solar
Renewable Energy	Wind	Wind
Transportation	Bicycles	Transportation
Transportation	Electric Vehicles & Charging	Transportation
Transportation	Fleet Efficiency	Transportation
Transportation	Fuel Transport	Fuel switching
Transportation	Mass Transit	Transportation
Transportation	Shipping	Transportation
Transportation	Truck Stop Electrification	Transportation
Waste Management	Composting	Biomass/biochar

Waste Management	Landfill Methane	Landfill methane
Waste Management	Methane Recovery in Wastewater	Water/purification
Waste Management	Waste Diversion	AVERAGE
Waste Management	Waste Incineration	Biomass/biochar
Waste Management	Waste Recycling	AVERAGE

Tabla 3: asignación valores de la variable enlace tipo - precio. Fuente: elaboración propia.

Con el fin de analizar posteriormente el impacto económico sobre los desarrolladores de proyectos, en particular, el beneficio económico que les reportaría la reducción de los márgenes que reciben los intermediarios de la venta de créditos de carbono, se introdujo una nueva columna en la Tabla 2 con la comparativa de la diferencia entre los precios del mercado primario y secundario. Dicha información queda recogida en la Tabla 4:

Project type	% Difference
Waste disposal	21.19%
Transportation	36.51%
Renewable Energy	173.29%
Household Devices	78.23%
Forestry and Land Use	65.55%
Energy Efficiency	60.53%
Chemical/Industrial	80.34%
Agriculture	156.16%

Tabla 4: comparativa del margen que reciben los intermediarios según el tipo de proyecto. Fuente: (AlliedOffsets, 2023).

De este modo, la Tabla 2 queda de la siguiente forma:

Tipo de proyecto	Precio medio (\$)	Precio mínimo (\$)	Precio máximo (\$)	Peso precio mín.	Peso precio máx.	Margen
Agro-forestry	9.90	9.00	11.00	55%	45%	156.16%
Biogas	5.90	1.00	20.00	74%	26%	173.29%
Biomass/biochar	3.00	0.90	20.00	89%	11%	173.29%
Clean cookstoves	4.90	2.00	20.00	84%	16%	78.23%
E.E. - Community	9.40	3.30	20.00	63%	37%	60.53%
E.E. - Industrial	4.10	0.10	20.00	80%	20%	80.34%
Fuel switching	11.40	3.50	20.00	52%	48%	80.34%
Geothermal	4.00	2.50	8.00	73%	27%	173.29%
Improved forest management	9.60	2.00	17.50	51%	49%	156.16%
Landfill methane	2.00	0.20	19.00	90%	10%	21.19%
Livestock methane	7.00	4.00	20.00	81%	19%	80.34%
REDD+	3.30	0.80	20.00	87%	13%	65.55%
Run-of-river hydro	1.40	0.20	8.00	85%	15%	173.29%

Solar	4.10	1.00	9.80	65%	35%	173.29%
Transportation	2.90	2.20	6.80	85%	15%	36.51%
Tree planting	7.50	2.20	20.00	70%	30%	65.55%
Water/purification	2.80	1.70	9.00	85%	15%	21.19%
Wind	1.90	0.30	18.00	91%	9%	173.29%
RE bundle	3.66	0.98	13.97	79%	21%	173.29%
AVERAGE	5.45	2.05	15.95	76%	24%	111.74%

Tabla 5: precios y márgenes de los créditos de carbono según tipo de proyecto. Fuente: elaboración propia a partir de (Opanda, 2023) y (AlliedOffsets, 2023).

Por último, también se han homogeneizado el estado de los proyectos, con el fin de aplicar reglas comunes a la hora de hacer cálculos de ahorro de tiempo derivados de la implementación del *dMRV*.

De esta forma, de veinte posibles estados en la base de datos original, el modelo tiene en cuenta los siguientes 8 estados, recogidos en la Tabla 6:

<b>Estado</b>	<b>Nuevo estado</b>
Canceled	Cancelado
Rejected by Administrator	Cancelado
Transfer to another GHG program	Cancelado
Transitioned	Cancelado
Withdrawn	Cancelado
On Hold	En pausa
Inactive	Inactivo
Registered	Monitorización y reporte
Completed	Oferta
Listed	Oferta
N/A	Oferta
Units Transferred from Approved GHG Program	Oferta
Gold Standard Certified Design	Recopilación de datos
Under development	Recopilación de datos
Gold Standard Certified Project	Validación y registro
Crediting Period Renewal Requested	Validación y registro
Registration requested	Validación y registro
Under validation	Validación y registro
Crediting Period Renewal and Verification Approval Requested	Verificación
Registration and verification approval requested	Verificación

Tabla 6: conversión del estado del proyecto. Fuente: elaboración propia.

Según los valores asignados por la Tabla 6 se han excluido los proyectos con valores en la variable Nuevo estado iguales a “Cancelado”, “En pausa”, o “Inactivo”. El estado “Oferta”, se refiere a proyectos que ya han emitido créditos de carbono y están activos, formando parte de la oferta del mercado voluntario de carbono.

Con relación a la duración de los proyectos, se ha tomado de referencia la información recogida en la Tabla 7:

<b>Fases de un proyecto</b>	<b>Duración mínima (mes)</b>	<b>Duración máxima (mes)</b>	<b>Media (mes)</b>	<b>Tiempo hasta emisión (meses)</b>
Planteamiento	1	12	6.5	43
Recopilación de datos y documentación del diseño del proyecto	6	12	9	36.5
Validación y registro	2	18	10	27.5
Monitorización y Reporte	4	24	14	17.5
Verificación	1	6	3.5	3.5
<b>TOTAL</b>			<b>43 meses</b>	
			<b>3.6 años</b>	

Tabla 7: duración estimada de un proyecto. Fuente: elaboración propia a partir de (Beken, 2022).

Como se explicará en la formulación del modelo, ha sido necesario realizar estimaciones acerca del volumen de la emisión de créditos de carbono para aquellos proyectos que no hubieran realizado ninguna emisión hasta la fecha, por encontrarse en fases de desarrollo. La estimación consistió en utilizar la media de todos los proyectos recogidos en la base de datos hasta la fecha, categorizados por tipo de proyecto. La información queda recogida en la Tabla 8:

<b>Tipo de proyecto</b>	<b>Media de créditos retirados por año</b>
Advanced Refrigerants	4,940
Afforestation/Reforestation	27,127
Aluminum Smelters Emission Reductions	29,047
Avoided Forest Conversion	86,158
Avoided Grassland Conversion	2,955
Bicycles	396
Biodigesters	12,840
Biomass	10,459
Brick Manufacturing Emission Reductions	10,345
Bundled Compost Production and Soil Application	29,047
Bundled Energy Efficiency	39,666
Carbon Capture & Enhanced Oil Recovery	148,533
Carbon Capture in Cement	600
Carbon Capture in Plastic	29,047
Carbon-Absorbing Concrete	29,047
Clean Water	9,191
Community Boreholes	3,675
Compost Addition to Rangeland	29,047

Composting	6,078
Cookstoves	12,253
Electric Vehicles & Charging	315
Energy Efficiency	10,801
Feed Additives	27
Fleet Efficiency	7,638
Fuel Switching	6,035
Fuel Transport	29,047
Geothermal	65,991
Grid Expansion & Mini-Grids	29,047
HFC Refrigerant Reclamation	12,833
HFC Replacement in Foam Production	10,654
HFC23 Destruction	84,165
Hydropower	25,901
Improved Forest Management	83,225
Improved Irrigation Management	3,766
Landfill Methane	22,744
Leak Detection & Repair in Gas Systems	249,318
Lighting	2,090
Manure Methane Digester	6,231
Mass Transit	5,294
Methane Recovery in Wastewater	12,095
Mine Methane Capture	19,623
N2O Destruction in Adipic Acid Production	431,562
N2O Destruction in Nitric Acid Production	111,135
Natural Gas Electricity Generation	52,753
Nitrogen Management	4
Oil Recycling	14,494
Ozone Depleting Substances Recovery & Destruction	16,141
Pneumatic Retrofit	13,333
Propylene Oxide Production	41,667
RE Bundled	19,292
REDD+	233,284
Refrigerant Leak Detection	9,613
Rice Emission Reductions	8,589
SF6 Replacement	79,950
Shipping	15,731
Solar - Centralized	47,524
Solar - Distributed	30,505
Solar Lighting	12,649
Solar Water Heaters	3,939
Solid Waste Separation	1,963
Sustainable Agriculture	14,840
Sustainable Grassland Management	71,627
Truck Stop Electrification	638
University Campus Emission Reductions	6,850
Waste Diversion	29,047
Waste Gas Recovery	100,930



Waste Heat Recovery	40,215
Waste Incineration	33,822
Waste Recycling	5,097
Weatherization	1,298
Wetland Restoration	23,730
Wind	22,005
<b>MEDIA</b>	<b>29,047</b>

Tabla 8: retirada media de créditos por año según tipo de proyecto. Fuente: elaboración propia desde base de datos (So, Haya, & Elias, 2023).

Para la elaboración de esta tabla se utilizó la variable “Créditos retirados por año”, filtrando aquellos proyectos que todavía no habían emitido ningún crédito y, por tanto, reducirían la media de su categoría. Para aquellas categorías en las que no hubiera información se asignó la media de todos los proyectos.

### 3.3 Formulación del modelo

A continuación, se definirán las variables numéricas intermedias necesarias para la formulación del modelo implementado en este proyecto. Posteriormente, se detallará el modelo empleado, a través de las fórmulas que relacionan las distintas variables intermedias, las variables de la base de datos, y las referencias empleadas y descritas en el apartado anterior.

Las variables numéricas establecidas son:

- a) **Créditos retirados por año:** esta variable pretende capturar la tendencia pasada de retirada de créditos de carbono según el tipo de proyecto. De esta forma, la variable tomará valor cero si no ha habido ninguna retirada hasta la fecha, y tomará la media de los años desde la primera retirada hasta el año 2023, fecha de la redacción del trabajo y fecha de la última actualización de la base de datos. La fórmula es la siguiente:

$$= IF(\text{Primer año del proyecto} = "", 0, \frac{\text{Créditos retirados totales}}{2023 - \text{Primer año del proyecto}})$$

- b) **Meses hasta emisión:** esta variable asigna el intervalo temporal que debe transcurrir hasta que el proyecto emita créditos de carbono por primera vez. Se realiza una búsqueda en la Tabla 7 en función de la variable “Nuevo estado”, que devuelve el tiempo restante hasta la emisión de créditos de carbono. La fórmula es la siguiente:

$$= VLOOKUP(\text{Nuevo estado}, \text{Tabla 7}, \text{Columna 5}, \text{FALSE})$$

Debido a la restricción de los valores recogidos en la Tabla 7, los únicos valores que puede tomar la variable son: 0, 3.5, 17.5, 27.5, y 36.5 (en el escenario base). Cabe destacar que esta variable toma valor cero tanto para proyectos cancelados como para proyectos que se encuentren ya emitiendo créditos de carbono, por lo que será necesario aplicar otras condiciones al usar esta variable, considerando este caso.

- c) **Año de emisión:** esta variable asigna el año en el que comenzará cada proyecto a emitir créditos de carbono.
- i. En el caso en el que el proyecto ya haya emitido créditos de carbono, se toma como referencia para el modelo el año 2023.
  - ii. En el caso en el que el proyecto se encuentre en estado cancelado, en pausa, o inactivo, o no haya información sobre el número total de créditos disponibles, el valor de la variable será cero.
  - iii. En otros casos, se calcula cuánto tiempo le queda al proyecto para comenzar a emitir créditos de carbono. El cálculo se redondeará a la unidad superior, de tal forma que se emitirá en el año siguiente.

De esta forma, la fórmula es la siguiente:

$$\begin{aligned} &= \text{IFS}(\text{Créditos disponibles totales} = 0, 0, \text{Nuevo estado} \\ &\quad = \text{OR}(\text{Cancelado, En pausa, Inactivo}), 0, \text{Meses hasta emisión} \\ &\quad = 0, 2023, \text{Meses hasta emisión} < \\ &\quad > 0, 2023 + \text{ROUNDUP}(\text{Meses hasta emisión}/12, 0) ) \end{aligned}$$

**d) Créditos a retirar por año (v1):** esta variable auxiliar permite calcular el patrón de retirada de créditos por proyecto, en el caso de que haya algún patrón en la base de datos. De lo contrario, la variable tomará el valor “A decidir”, que será información necesaria en la siguiente variable auxiliar.

- i. En el caso en el que no haya más créditos disponibles, la variable toma valor cero.
- ii. En el caso en el que el año de emisión sea cero, la variable toma valor cero.
- iii. En el caso en el que el año de emisión sea 2023, la variable toma el valor de la variable “Créditos retirados por año”
- iv. En el caso en el que el año de emisión sea posterior al año 2023, la variable toma el valor “A decidir”.

La fórmula es la siguiente:

$$\begin{aligned} &= \text{IFS}(\text{Créditos disponibles totales} = 0, 0, \text{Año de emisión} \\ &\quad = 0, 0, \text{Año de emisión} \\ &\quad = 2023, \text{Créditos retirados por año}, \text{Año de emisión} \\ &\quad > 2023, \text{"A decidir"}) \end{aligned}$$

**e) Créditos a retirar por año (v2):** esta variable auxiliar complementa los valores asignados por la variable “Créditos a retirar por año (v1)”. De esta forma, en el caso en el que el valor de esa variable sea “A decidir”, se hará una búsqueda en la Tabla 8, que asignará el valor medio de la categoría del proyecto. De lo contrario, extraerá el valor de la variable “Créditos a retirar por año (v1)”. La fórmula es la siguiente:

$$\begin{aligned} &= \text{IF}(\text{Créditos a retirar por año (v1)} \\ &= \text{A decidir}, \text{VLOOKUP}(\text{Tipo de proyecto}, \text{Tabla 8}, \text{Columna 2}, \text{FALSE}), \text{Créditos a retirar por año} \end{aligned}$$

**f) Delta v2 – v1:** esta variable auxiliar se definió como medida de control de la asignación de valores estimados realizada a través de la variable “Créditos a retirar por año (v2)”. De esta forma, la variable calcula la diferencia entre los

calores de “Créditos a retirar por año (v2)” y “Créditos a retirar por año (v1)”. Esta variable solamente tomará valores distintos y superiores a cero cuando haya habido una asignación. La fórmula es la siguiente:

$$= \text{“Créditos a retirar por año (v2)”} - \text{“Créditos a retirar por año (v1)”}$$

De los 7.933 casos, hubo 2.899 casos de estimaciones de valores.

**g) Créditos a retirar por año (final):** el objetivo de usar las variables auxiliares recién definidas era obtener el valor de créditos a retirar por año según cada tipo de proyecto, valor que recoge esta variable. La fórmula es la siguiente:

$$= IF(\text{Delta } v2 - v1 \\ = 0, \text{Créditos a retirar por año (v1)}, \text{Créditos a retirar por año (v2)})$$

**h) Años de retiradas:** esta variable determina el periodo de permanencia de un proyecto en el mercado voluntario de carbono en función de la “velocidad” con la que se demanden sus créditos de carbono. Esta medida de velocidad se ha medido en función de la ratio de créditos disponibles totales sobre el volumen de créditos retirados por año. El número de años se redondea a la unidad inmediatamente superior. La fórmula es la siguiente:

$$= IF(\text{Créditos disponibles totales} \\ = 0, 0, \text{ROUNDUP}(\frac{\text{Créditos disponibles totales}}{\text{Créditos a retirar por año (final)}, 0))$$

**i) Año final del proyecto:** esta variable considera el número de años a lo largo de los cuáles se van a producir retiradas para establecer, en función del número de créditos disponibles totales, el año en el que ese balance llegará a cero.

- i. En el caso en el que no vaya a haber demanda en el proyecto, debido a que no haya disponibilidad de créditos en el mismo, el valor será cero (medido a través del número de años de retiradas disponibles).
- ii. En el caso en el que el número de años de retiradas sea menor de 27, se calculará la suma del número de años de retiradas y el año 2023, para ver en qué año terminará dicho proyecto. La razón de elegir el número 27 tiene que ver con la diferencia entre 2050 y 2023. En el año 2050, se pretende alcanzar la neutralidad climática.
- iii. Por tanto, para aquellos proyectos en los que los parámetros del modelo establecen que la demanda estimada no terminará con el balance de créditos para el año 2050, se fuerza a que termine ese año, de tal modo que la demanda aumente.

La fórmula es la siguiente:

$$= IFS(\text{Años de retiradas} = 0, 0, \text{Años de retiradas} < 27, \text{Año de emisión} + \text{Años de retiradas}, \text{Años de retiradas} \geq 27, 2050)$$

- j) Aumento anual de la oferta (emisiones):** esta variable cuantifica el volumen anual de emisiones de créditos del proyecto. Para ello, tiene en cuenta el año de inicio de las emisiones de créditos de carbono, el volumen total de créditos disponibles, y el año final del proyecto.
- i. En el caso en el que el año de inicio de emisiones sea menor que cero, el valor de esta variable será cero, ya que ese proyecto no tendrá créditos que aportar al mercado.
  - ii. En el caso en el que el año de inicio de las emisiones sea el 2023, el valor de esta variable será cero. El racional detrás de esta decisión tiene que ver con el hecho de que, si los créditos ya están disponibles en el año 2023, todos esos créditos se incorporarán directamente al mercado en forma de oferta en ese mismo año.
  - iii. En el caso en el que el año de inicio de emisiones sea mayor que el año 2023, el valor dependerá del volumen de créditos a emitir y el ritmo de emisión de dichos créditos.

La fórmula es la siguiente:

$$= IF(\text{Año de emisión} \leq 2023, 0, \frac{\text{Créditos totales disponibles}}{\text{Año final de proyecto} - \text{Año de emisión}})$$

Una vez definidas las variables del modelo, queda definir el modelo de oferta – emisiones – demanda – balance establecido. Los parámetros del año 2023 tendrán una definición ligeramente diferente en comparación con los siguientes años en los que se desarrolla el modelo. De esta forma, la formulación es la siguiente:

- Oferta 2023: la oferta del mercado en el año 2023 tendrá que ver con el estado en el que se encuentren los proyectos y, por tanto, su primer año de emisión en este mercado cerrado que se ha dimensionado durante la realización de este proyecto. Solamente se incorporarán a la oferta del primer año del mercado de este modelo aquellos créditos ya emitidos de proyectos en estado de “Oferta”.

De esta forma, la oferta de un proyecto en el año 2023 viene determinada por la fórmula:

$$= IF(\text{Año de emisión} = 2023, \text{Créditos totales disponibles}, 0)$$

La oferta agregada del mercado será la suma de la oferta de cada uno de los proyectos.

- Emisiones 2023: como se ha comentado en la definición de las variables, en el año 2023 no habrá emisiones, ya que todos los créditos disponibles de proyectos en estado “Oferta” se incorporarán al mercado. Por lo tanto, esos quedan integrados bajo el parámetro “Oferta 2023”.
- Demanda 2023: la demanda de este mercado estará relacionada con el año de inicio de las emisiones de créditos por parte de los proyectos, así como por el balance de créditos en el proyecto comparado con la demanda estimada según el proyecto y/o el tipo de proyecto. Según esta lógica:
  - Si el año de emisión coincide con el año 2023, significa que los créditos de ese proyecto se encuentran entre la oferta del mercado y, por tanto, puede existir demanda sobre ellos.
  - En el caso en el que la demanda estimada esté por debajo del número de créditos totales disponibles, esa demanda será la demanda final.
  - Por el contrario, si la demanda estimada está por encima del número de créditos totales disponibles, será ese balance de créditos disponibles el que será demandado, terminando por tanto la vida de ese proyecto.

De esta forma, la demanda de un proyecto en el año 2023 viene determinada por la fórmula:

$$\begin{aligned} &= IF(\text{Año de emisión} \\ &= 2023, IF(\text{Créditos a retirar por año (final)} \\ &< \text{Créditos totales disponibles}, \text{Creditos a retirar por año (final)}, \text{Créditos totales disponibles}) \end{aligned}$$

La demanda agregada del mercado será la suma de la demanda de cada uno de los proyectos.

- Balance 2023: este parámetro establece un balance entre la diferencia entre la oferta incorporada por el proyecto al mercado, y la demanda que ha recibido. Servirá de valor de referencia para la oferta del año siguiente.

De esta forma, el balance de un proyecto en el año 2023 viene determinado por la fórmula:

$$= \text{Oferta 2023} - \text{Demanda 2023}$$

El balance del mercado será la suma de los balances de cada uno de los proyectos.

Con este punto de partida, el modelo se ha establecido hasta el año 2030, teniendo en cuenta que las asunciones de oferta y demanda tienen ese carácter temporal, así como las referencias de fuentes externas. Además, en opinión del autor, realizar estimaciones temporales en un horizonte mayor de tiempo hace que la calidad de la estimación a partir de una determinada fecha comience a disminuir, desvirtuando para los últimos años del modelo la posible realidad con lo que de verdad ocurra en ese futuro.

De esta forma, los parámetros empleados entre los años 2024 y 2030 vienen definidos por la siguiente formulación (el parámetro *año* tomará los valores 2024, 2025, 2026, 2027, 2028, 2029, y 2030):

- Oferta *año*: la oferta del mercado en un año determinado estará relacionada con el “Balance” de créditos del año anterior, así como con el volumen de emisiones de créditos por parte de todos los proyectos.

De esta forma, la oferta de un proyecto en un *año* viene determinada por la fórmula:

$$\text{Oferta año} = \text{Balance} (\text{año} - 1) + \text{Emisiones año}$$

La oferta agregada del mercado será la suma de la oferta de cada uno de los proyectos.

- Emisiones *año*: las emisiones de un proyecto en un año determinado vienen determinadas por el año de inicio de las emisiones de ese proyecto y de su demanda estimada.

De esta forma, las emisiones de un proyecto en un *año* vienen determinadas por la fórmula:

$$\begin{aligned} \text{Emisiones año} \\ = IF(AND(\text{Año de emisión} > (\text{año} - 1), \text{Año de emisión} \\ \leq \text{año}), \text{Aumento anual de la oferta (emisiones)}, 0) \end{aligned}$$

Las emisiones agregadas del mercado serán la suma de las emisiones de cada uno de los proyectos.

- Demanda *año*: la demanda de este mercado estará relacionada con el año de inicio de las emisiones de créditos por parte de los proyectos, así como por el balance de créditos en el proyecto comparado con la demanda estimada según el proyecto y/o el tipo de proyecto

De esta forma, la demanda de un proyecto en un año viene determinada por la fórmula:

$$\begin{aligned}
&= IF(\text{Año de emisión} \\
&\quad \leq \text{año}, IF(\text{Balance}(\text{año} - 1) \\
&\quad < \text{Créditos a retirar por año (final)}, \text{Balance}(\text{año} \\
&\quad - 1), \text{Creditos a retirar por año (final)}, 0)
\end{aligned}$$

La demanda agregada del mercado será la suma de la demanda de cada uno de los proyectos.

- Balance año: este parámetro establece un balance entre la diferencia entre la oferta incorporada por el proyecto al mercado, y la demanda que ha recibido. Servirá de valor de referencia para la oferta del año siguiente. La fórmula es la siguiente:

$$= \text{Oferta año} - \text{Demanda año}$$

El balance del mercado será la suma de los balances de cada uno de los proyectos.



### 3.4 Implantación numérica

Tras el desarrollo del modelo, este se implementó utilizando para ello la base de datos de la Universidad de California (So, Haya, & Elias, 2023). A continuación, se presentan los primeros resultados numéricos obtenidos:

	<b>Oferta</b>	<b>Emisiones</b>	<b>Demanda</b>	<b>Balance</b>
<b>2023</b>	89.82	-	15.48	74.34
<b>2024</b>	74.50	0.16	9.05	65.45
<b>2025</b>	120.42	54.96	7.07	113.34
<b>2026</b>	183.27	69.93	52.22	131.06
<b>2027</b>	201.09	70.03	63.99	137.10
<b>2028</b>	207.12	70.03	63.53	143.59
<b>2029</b>	213.62	70.03	62.67	150.95
<b>2030</b>	220.98	70.03	62.36	158.61

*Tabla 9: resultados implementación numérica del modelo [millones de créditos]. Fuente: elaboración propia.*

Los valores recogidos en la Tabla 9 representan la evolución temporal de la oferta, las emisiones, la demanda, y el balance del mercado voluntario de carbono simulado en este trabajo. Estas cifras se refieren al volumen de créditos de carbono del mercado, en unidades de millón. De esta forma, y considerando el hecho de que un crédito de carbono represente una tonelada de equivalentes de CO<sub>2</sub>, la Tabla 9 también representa las megatoneladas de equivalentes de CO<sub>2</sub> evitadas o secuestradas como consecuencia de las actividades desarrolladas por los proyectos del mercado voluntario de carbono.

Cabe destacar que los valores de oferta y demanda recogidos en dicha tabla no coinciden con las referencias realizadas en las fuentes mencionadas en el capítulo 2. Estado de la cuestión. Este desajuste es consecuencia de las restricciones establecidas por el autor sobre el modelo y la base de datos (i.e., exclusión de proyectos ya finalizados, en pausa, o cancelados; entre otras razones). Además, como se explicó en la sección anterior, las emisiones en el año 2023 se establecieron a valor cero.

## 4. Análisis de resultados

Tras la implantación numérica del modelo, en este capítulo se analizarán los resultados del caso base, así como se realizará un análisis de sensibilidad tras la aplicación de distintos escenarios de i) oferta y ii) demanda, así como iii) un escenario mixto de aumento de oferta y de demanda.

### 4.1 Resultados del caso base

Los resultados del caso base se recogen en la Tabla 10, en unidades de millones de créditos de carbono o megatoneladas de emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub>:

Escenario base								
	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
<b>Oferta</b>	89.8	74.5	120.4	183.3	201.1	207.1	213.6	221.0
<b>Emisiones</b>	-	0.2	55.0	69.9	70.0	70.0	70.0	70.0
<b>Demanda</b>	15.5	9.0	7.1	52.2	64.0	63.5	62.7	62.4
<b>Balance</b>	74.3	65.5	113.3	131.1	137.1	143.6	151.0	158.6

Tabla 10: resultados del caso base [millones de créditos]. Fuente: elaboración propia.

Observando las tendencias de la oferta, se puede apreciar el gran impacto que tiene sobre ella el estado de los proyectos, especialmente a partir del año 2025, cuando un importante número de proyectos recogidos en la base de datos comenzarían a emitir créditos de carbono.

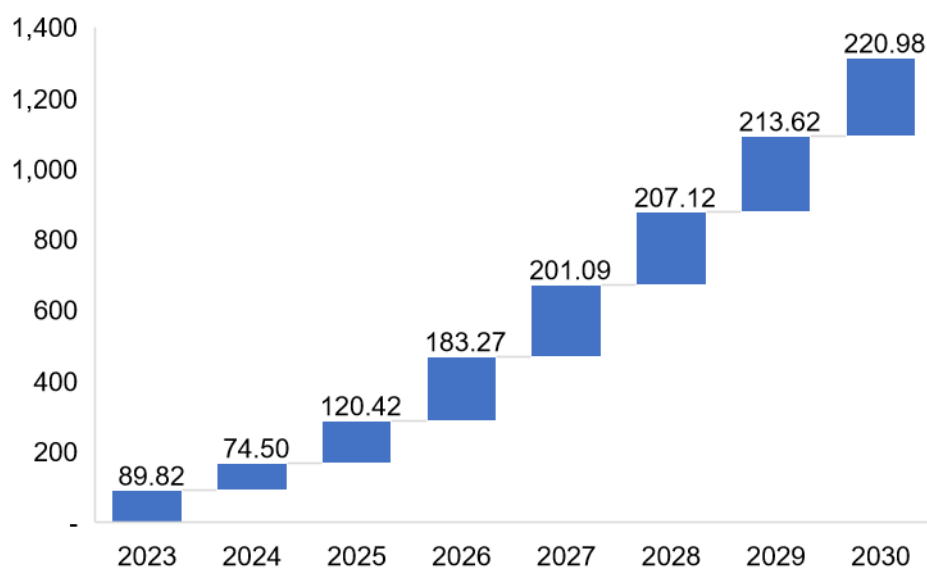


Gráfico 1: evolución de la oferta del mercado [millones de créditos]. Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, una forma de ver ese salto en la oferta debido a la incorporación al mercado de nuevos proyectos es observando las emisiones. El Gráfico 2 muestra claramente el salto que tiene lugar en el año 2025:

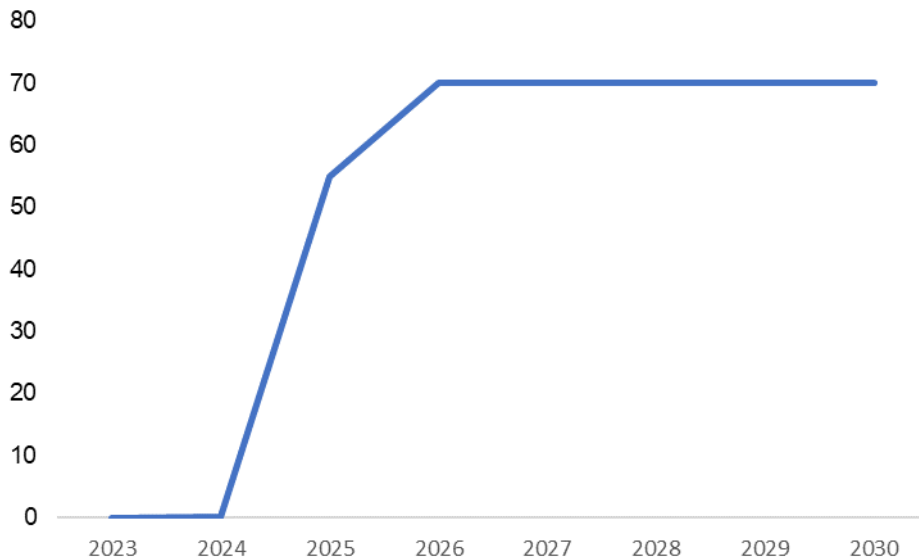


Gráfico 2: emisiones de créditos de carbono en el mercado [millones de créditos]. Fuente: elaboración propia.

También es interesante destacar la saturación del modelo a partir del año 2026, a partir del cual la emisión de créditos de carbono se realiza a un ritmo constante.

Prestando atención ahora a la demanda del mercado, el Gráfico 3 muestra la evolución de este parámetro del modelo a lo largo de los años. Debido a la configuración del modelo, la demanda del mercado se ve influenciada en gran medida por la muestra de proyectos que se encuentran emitiendo créditos de carbono en cada momento. Observando el modelo con mayor precisión, la demanda de un proyecto en un año determinada está influenciada por el balance de ese mismo proyecto en el año anterior.

Consecuentemente, el gran salto que se aprecia a partir del año 2026 tiene que ver con el hecho de que la demanda de ese año esté ligada al balance de créditos de carbono de un proyecto de terminado en el año 2025. Puesto que un gran número de proyectos comienzan a emitir en ese año, su balance aumenta en el año 2025, y su demanda en el año 2026.

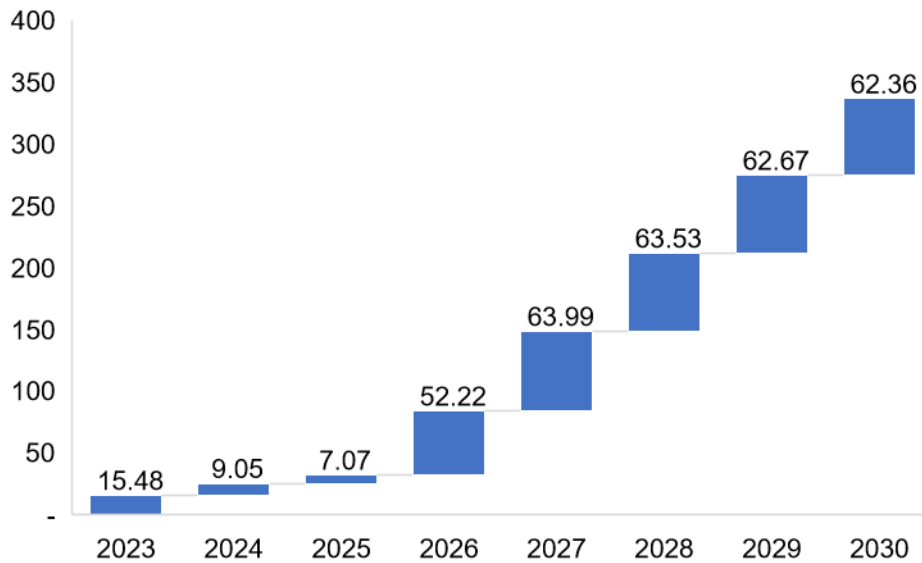


Gráfico 3: evolución de la demanda del mercado [millones de créditos]. Fuente: elaboración propia.

Otro punto de vista desde el que observar el razonamiento explicado anteriormente queda recogido en el Gráfico 4:

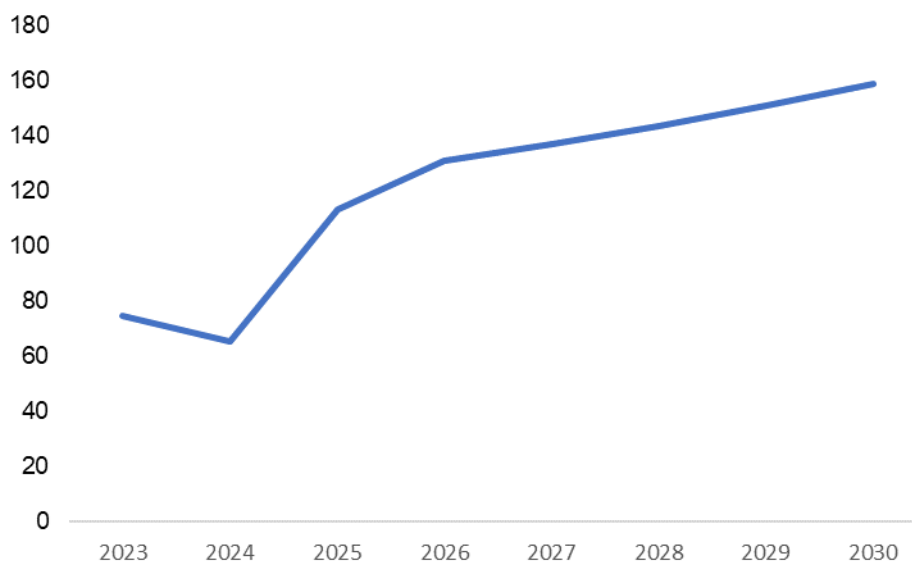


Gráfico 4: evolución del balance del mercado [millones de créditos]. Fuente: elaboración propia.

A diferencia de la evolución de las emisiones de créditos, el balance del mercado mantiene una tendencia alcista, como consecuencia de que la demanda de créditos de carbono asociada a cada proyecto depende del saldo de créditos disponibles en el propio proyecto. A medida que los créditos son emitidos y retirados, este saldo disminuye, reduciéndose por tanto la demanda, y aumentando en contraposición el balance en el mercado.

## 4.2 Análisis de sensibilidad

Esta sección se dividirá en tres partes: la primera centrada en el impacto sobre el caso base de los distintos escenarios de oferta, la segunda centrada en el impacto semejante de los distintos escenarios de demanda, y la tercera, combinando los efectos sobre la oferta y sobre la demanda.

### 4.2.1 Escenarios de oferta

Una de las propuestas presentadas en este trabajo para impulsar la escalabilidad del mercado voluntario de carbono tiene que ver con la digitalización de las etapas de medición, reporte, y verificación (*dMRV*) de los procesos de emisión de créditos de carbono (ver sección 2.2.1 Digitalización de la medición, reporte, y verificación).

Como se explicó en el capítulo 3. *Descripción del modelo desarrollado* la duración media del proceso de emisión de créditos de carbono conlleva aproximadamente 43 meses (ver Tabla 7).

En los escenarios de oferta se simularon dos situaciones de alteración de la oferta como consecuencia de la implementación del *dMRV*: uno optimista, que conlleva la reducción a la mitad del tiempo necesario en las etapas impactadas por el *dMRV*, y uno medio, que conlleva la reducción del tiempo de esas mismas etapas en tan solo un cuarto (50% vs 25% en ahorro de tiempo necesario en el desarrollo de las etapas de *Validación y registro*, *Monitorización y reporte*, y *Verificación*).

Además de esta reducción de tiempo, el modelo de *dMRV* conlleva un ahorro de tiempo en la emisión de los créditos de carbono como consecuencia de la interconexión de los agentes del mercado a través de esta nueva infraestructura. El impacto de esta medida se ha traducido en una reducción del tiempo medio necesario para la etapa de *Verificación* desde 3,5 meses a 0,5 meses únicamente en el escenario optimista. En el escenario medio, el ahorro de tiempo se mantiene en un 25%.

Los nuevos tiempos involucrados en dichas etapas quedan recogidos en la Tabla 11 y en la Tabla 12:

Fases de un proyecto	Duración mínima (mes)	Duración máxima (mes)	Media (mes)	Tiempo hasta emisión (meses)
Planteamiento	1	12	6.5	28.5
Recopilación de datos y documentación del diseño del proyecto	6	12	9	22
Validación y registro	1	9	5	13
Monitorización y Reporte	2	12	7	8
Verificación	0	1	0.5	0.5
<b>TOTAL</b>			<b>28 meses</b>	
			<b>2.3 años</b>	

Tabla 11: duración estimada de un proyecto bajo el escenario optimista de oferta. Fuente: elaboración propia a partir de (Beken, 2022).

Fases de un proyecto	Duración mínima (mes)	Duración máxima (mes)	Media (mes)	Tiempo hasta emisión (meses)
Planteamiento	1	12	6.5	36.1
Recopilación de datos y documentación del diseño del proyecto	6	12	9	29.6
Validación y registro	1.5	13.5	7.5	20.6
Monitorización y Reporte	3	18	10.5	13.1
Verificación	0.75	4.5	1	2.6
<b>TOTAL</b>			<b>36.1 meses</b>	
			<b>3 años</b>	

Tabla 12: duración estimada de un proyecto bajo el escenario medio de oferta. Fuente: elaboración propia a partir de (Beken, 2022).

Considerando el tiempo necesario para el proceso completo de emisión de créditos de carbono, el ahorro en el escenario optimista conlleva un 35% menos de tiempo. En el escenario medio, este ahorro de tiempo queda reducido a un 16% del tiempo original.

Los resultados de ambos escenarios quedan recogidos en la Tabla 13 y la Tabla 14:

Escenario optimista								
	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
<b>Oferta</b>	89.8	128.8	189.1	205.0	208.2	213.5	219.4	226.1
<b>Emisiones</b>	-	54.4	69.4	69.4	69.4	69.4	69.4	69.4
<b>Demanda</b>	15.5	9.0	53.6	66.2	64.1	63.5	62.7	62.4
<b>Balance</b>	74.3	119.7	135.6	138.8	144.1	150.0	156.7	163.8

Tabla 13: resultados del escenario optimista de oferta [millones de créditos]. Fuente: elaboración propia.

Escenario medio								
	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
<b>Oferta</b>	89.8	74.5	135.3	198.2	202.0	207.8	214.3	221.5
<b>Emisiones</b>	-	0.2	69.8	69.9	69.9	69.9	69.9	69.9
<b>Demanda</b>	15.5	9.0	7.1	66.1	64.1	63.5	62.7	62.4
<b>Balance</b>	74.3	65.5	128.2	132.0	137.9	144.3	151.6	159.2

Tabla 14: resultados del escenario medio de oferta [millones de créditos]. Fuente: elaboración propia.

Los resultados del escenario optimista y medio muestran como el ahorro en el tiempo necesario para la emisión de créditos de carbono suponen un adelanto de dos años en el alcance del pico de emisiones del mercado (ver Gráfico 5).

La principal diferencia entre los resultados observados entre el escenario optimista y el medio tienen que ver con el ritmo en el que se consigue alcanzar ese pico de saturación de la emisión de créditos. Mientras que, en el escenario optimista, ese alcance se traduce en dos años de aumento de emisiones, semejante al case base, en el escenario medio el aumento se produce en un año.

Con relación al valor de saturación alcanzado, los tres escenarios presentan valores similares, ya que el impacto se realiza en el proceso de emisión y no en la capacidad de emisión del mercado (dado el sistema cerrado del modelo y la base de datos).

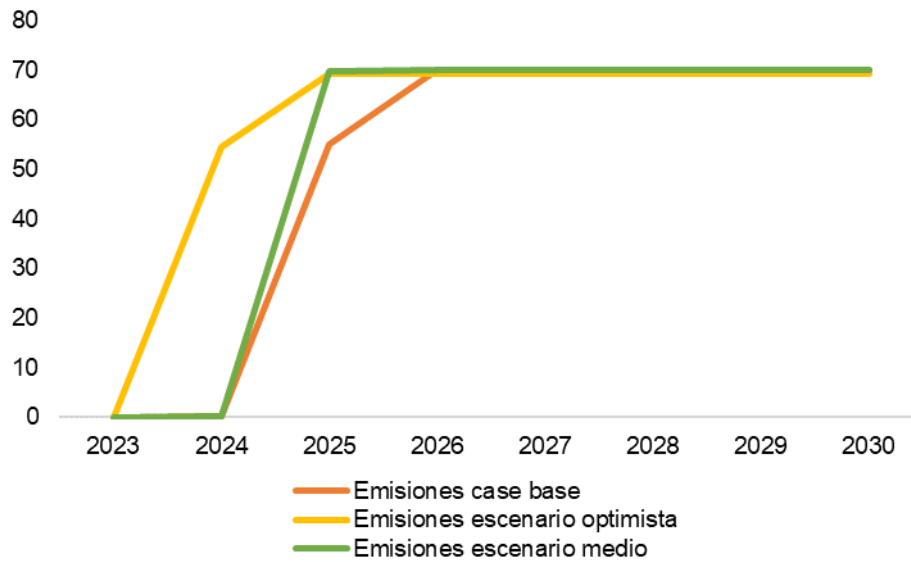


Gráfico 5: comparativa de las emisiones de créditos de carbono en el mercado en los tres escenarios de oferta [millones de créditos]. Fuente: elaboración propia.

Observando el balance del mercado, se aprecian grandes diferencias entre el escenario optimista y el escenario medio. Al contrario de lo que ocurre con las emisiones, en este ámbito, el balance del escenario medio presenta un patrón similar al caso base, pero con una pendiente de crecimiento del balance mayor.

Sin embargo, el escenario optimista presenta un patrón totalmente distinto. Mientras que el caso base y el escenario medio presentan un valor valle en el balance del mercado en el año 2024 (como consecuencia del aumento de la demanda muy por encima al aumento de la oferta), el escenario optimista es capaz de mantener un nivel superior en el año 2024 respecto al año 2023 (ver Gráfico 6). Este hecho será relevante en el caso de escenarios mixtos de afección de la oferta y la demanda.

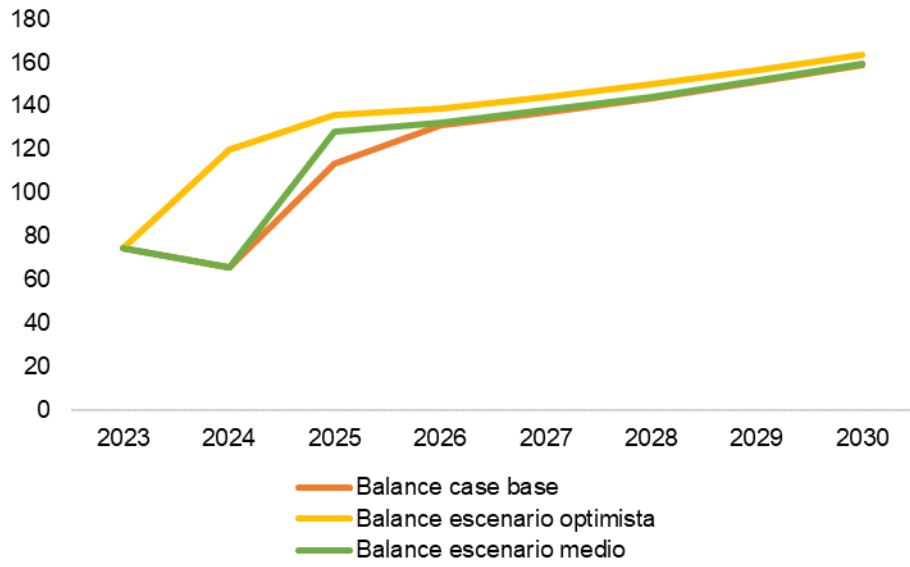


Gráfico 6: comparativa del balance de créditos de carbono en el mercado en los tres escenarios de oferta [millones de créditos]. Fuente: elaboración propia.



#### 4.2.2 Escenarios de demanda

La segunda de las propuestas para escalar el mercado voluntario de carbono recogidas en este trabajo tiene que ver con la inclusión de Tecnología de Contabilidad Descentralizada (*DLT*, en inglés), como puede ser el blockchain, lo que conllevaría la tokenización de créditos de carbono.

Como se explicó en el capítulo 2. 2.2.2 *El potencial de blockchain en el Mercado Voluntario de Carbono*, algunos de los beneficios derivados de la adopción de esta tecnología resultan en transacciones inmediatas, mayor transparencia de precios, y reducción de barreras de entrada para nuevos agentes del mercado.

En esta sección se emplearán las estimaciones de demanda realizadas por *Trove Research* y la *University College London* (Trove Research, 2021). Las estimaciones<sup>24</sup> conllevan un aumento de la demanda entre los años 2020 y 2030 de entre cinco y quince veces.

Debido a que este trabajo se realiza en el año 2023, y para facilitar los cálculos numéricos, en el escenario optimista el aumento de demanda se establecerá en diez veces la demanda en el año 2023, mientras que, en el escenario medio, dicho aumento quedará limitado a cinco veces la demanda del año 2023. También se considera que todo el impacto del aumento en la demanda se realizará como consecuencia de la inclusión de blockchain en el mercado.

El aumento de demanda se ha establecido de forma gradual, escalonando la consecución del múltiplo de la demanda a lo largo de los años como se recoge en la Tabla 15:

	<b>2024</b>	<b>2025</b>	<b>2026</b>	<b>2027</b>	<b>2028</b>	<b>2029</b>	<b>2030</b>
<b>Variación con respecto al año anterior</b>	5%	10%	15%	15%	20%	20%	15%

*Tabla 15: aumento de la demanda con respecto al año anterior. Fuente: elaboración propia.*

Esta consideración va ligada al estudio posterior del impacto económico de la inclusión de blockchain en el mercado. Debido a la diferencia de beneficio obtenido por parte de los desarrolladores de proyectos al depender en menor medida de los intermediarios del mercado.

Los resultados de ambos escenarios quedan recogidos en la Tabla 16 y la Tabla 17:

---

<sup>24</sup> Ver tabla 4 en el documento citado (página 15).

Escenario optimista								
	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
<b>Oferta</b>	89.8	74.5	107.0	140.6	153.3	145.1	109.1	45.1
<b>Emisiones</b>	-	0.2	55.0	69.9	70.0	70.0	70.0	70.0
<b>Demanda</b>	15.5	22.5	36.4	57.3	78.2	106.1	133.9	154.8
<b>Balance</b>	74.3	52.0	70.6	83.3	75.1	39.0	(24.9)	(109.7)

Tabla 16: resultados del escenario optimista de demanda [millones de créditos]. Fuente: elaboración propia.

Escenario medio								
	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
<b>Oferta</b>	89.8	74.5	110.9	156.0	192.0	218.7	232.9	234.8
<b>Emisiones</b>	-	0.2	55.0	69.9	70.0	70.0	70.0	70.0
<b>Demanda</b>	15.5	18.6	24.8	34.1	43.4	55.7	68.1	77.4
<b>Balance</b>	74.3	55.9	86.1	122.0	148.6	162.9	164.8	157.4

Tabla 17: resultados del escenario medio de demanda [millones de créditos]. Fuente: elaboración propia.

Como era de esperar, al no haber variaciones en las emisiones de créditos de carbono por parte de los proyectos, los tres escenarios presentan la misma tendencia (ver Gráfico 7), que también coincide con el escenario base del escenario de oferta.

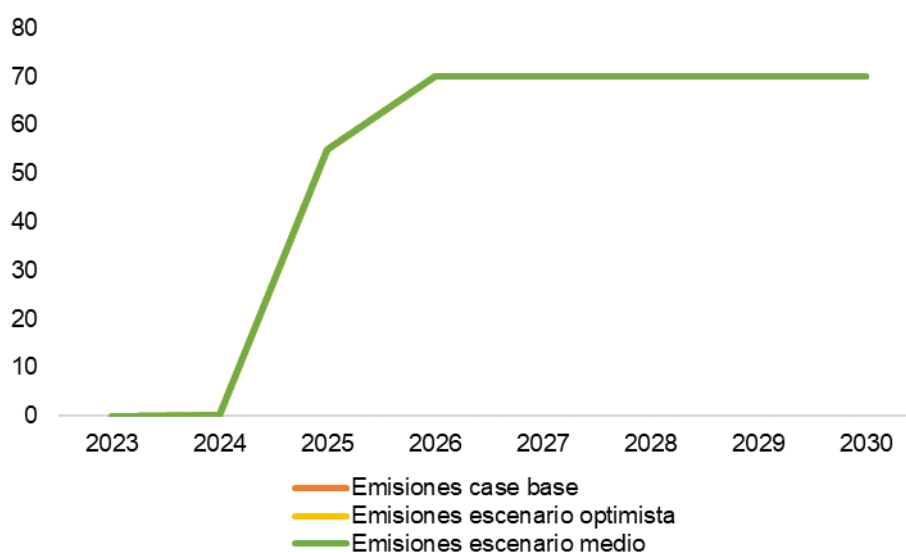


Gráfico 7: comparativa de las emisiones de créditos de carbono en el mercado en los tres escenarios de demanda [millones de créditos]. Fuente: elaboración propia.

Por el contrario, las variaciones más importantes respecto al caso base dan en el balance de créditos de carbono en el mercado. El Gráfico 8 recoge la comparativa del balance de créditos de carbono en el mercado en los tres escenarios mencionados, donde se puede apreciar como el resultado entre el escenario optimista y el escenario medio presentan patrones muy diferentes.

En el escenario medio de demanda, la tendencia alcista como consecuencia de un volumen de emisiones de créditos por encima de su demanda reduce progresivamente su carácter positivo hasta el año 2029, momento en el cual se produce un inicio de tendencia negativa (mayor demanda que emisiones de créditos). Sin embargo, la pendiente de esta tendencia decreciente es diez veces menor que la anterior tendencia positiva. De esta forma, a partir del año 2029 el balance de créditos en el mercado es ligeramente inferior al del caso base.

En el escenario optimista de demanda, con la misma tendencia de aumento de demanda (ver Tabla 15) pero con un múltiplo de demanda dos veces mayor, el patrón observado es completamente distinto. De esta forma, la tendencia positiva de aumento del balance de créditos en el mercado alcanza su pico en el año 2026, tres años antes cuando se compara con el escenario medio. A partir de ese año, se observa el inicio de una tendencia negativa, que se acentúa a partir del año 2027, con el aumento del ritmo en el que se incrementa la demanda.

Lo más singular a destacar de esta situación es el valor negativo que alcanza el balance en el año 2029. Un balance negativo (estimado) en el mercado se traduce en lo que para la empresa sería una “rotura de stock”, por lo que no toda la demanda del mercado podría ser satisfecha. Consecuentemente, se produciría un aumento del precio de los créditos de carbono tras este shock de demanda.

Este análisis queda resumido en el Gráfico 8:

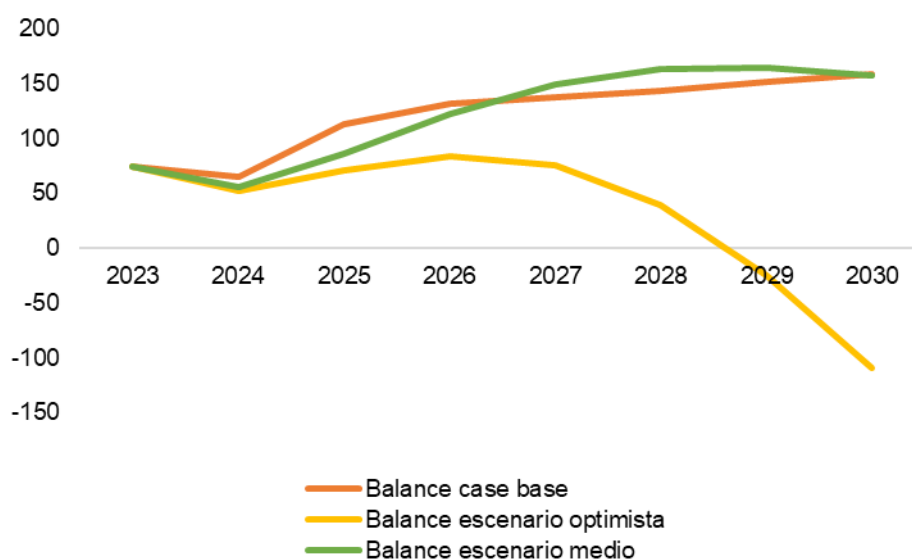


Gráfico 8: comparativa del balance de créditos de carbono en el mercado en los tres escenarios de demanda [millones de créditos]. Fuente: elaboración propia.

Sin embargo, la principal explicación de este balance negativo tiene que ver con la saturación de las emisiones de créditos de carbono (ver Gráfico 7), debido al carácter “sintético” del mercado estudiado. La consecuencia de esta situación sería un aumento de los precios de los créditos de carbono, debido a la diferencia tan importante entre oferta y demanda.

### 4.2.3 Escenarios mixtos

Dados los resultados recogidos en las dos secciones anteriores, en esta tercera y última parte del capítulo de Análisis de resultados se presenta un escenario mixto en el que se aplican a la vez las hipótesis de aumento de oferta y de demanda.

De esta forma, los resultados de ambos escenarios optimista y medio quedan recogidos en la Tabla 18 y la Tabla 19:

Escenario optimista								
	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
<b>Oferta</b>	89.8	128.8	175.7	208.7	220.9	212.1	175.4	110.9
<b>Emisiones</b>	-	54.4	69.4	69.4	69.4	69.4	69.4	69.4
<b>Demanda</b>	15.5	22.5	36.4	57.3	78.2	106.1	133.9	154.8
<b>Balance</b>	74.3	106.3	139.3	151.4	142.7	106.0	41.5	(44.0)

Tabla 18: resultados del escenario optimista mixto [millones de créditos]. Fuente: elaboración propia.

Escenario medio								
	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
<b>Oferta</b>	89.8	74.5	125.8	170.9	206.8	233.4	247.6	249.4
<b>Emisiones</b>	-	0.2	69.8	69.9	69.9	69.9	69.9	69.9
<b>Demanda</b>	15.5	18.6	24.8	34.1	43.4	55.7	68.1	77.4
<b>Balance</b>	74.3	55.9	101.0	136.9	163.4	177.6	179.4	172.0

Tabla 19: resultados del escenario medio mixto [millones de créditos]. Fuente: elaboración propia.

Con relación a las emisiones de créditos, no hay variación respecto al escenario de oferta representado en el Gráfico 5, y, por tanto, las emisiones saturan entre el año 2024 y el año 2026, con distinto patrón en función del escenario:

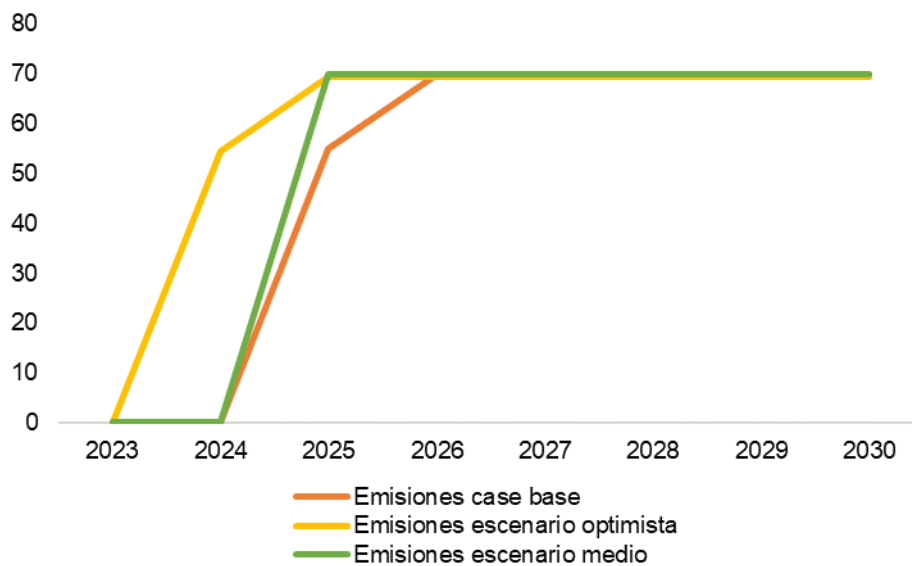


Gráfico 9: comparativa de las emisiones de créditos de carbono en el mercado en los tres escenarios mixtos [millones de créditos]. Fuente: elaboración propia.

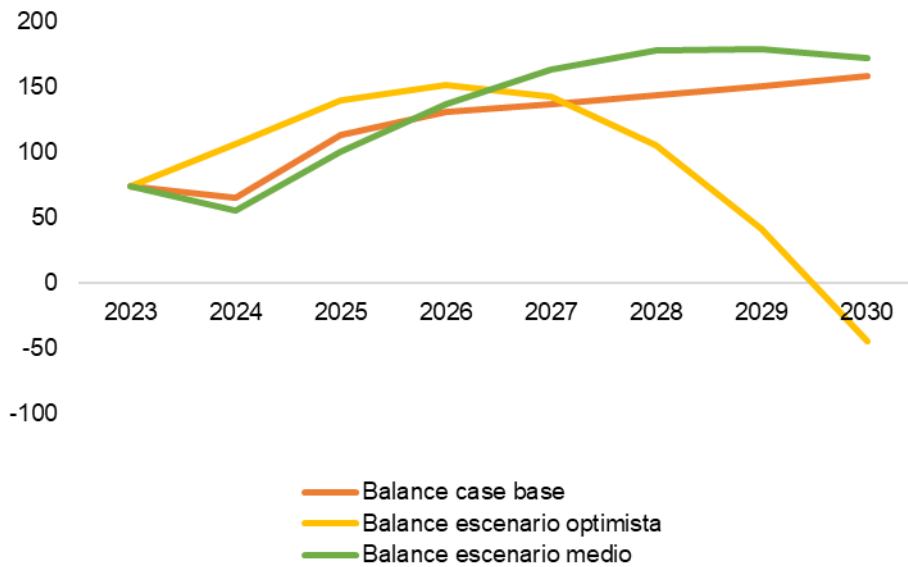


Gráfico 10: comparativa del balance de créditos de carbono en el mercado en los tres escenarios mixtos [millones de créditos]. Fuente: elaboración propia.

Las grandes diferencias, por tanto, se aprecian en el balance de créditos de carbono en el mercado. Como queda representado en el Gráfico 10, en el escenario medio el patrón de crecimiento y disminución del balance es similar al del escenario de demanda. Sin embargo, debido al aumento de las emisiones de créditos de carbono, el valor absoluto de dicho balance es superior, trasladando verticalmente dicha curva (línea verde en Gráfico 11).

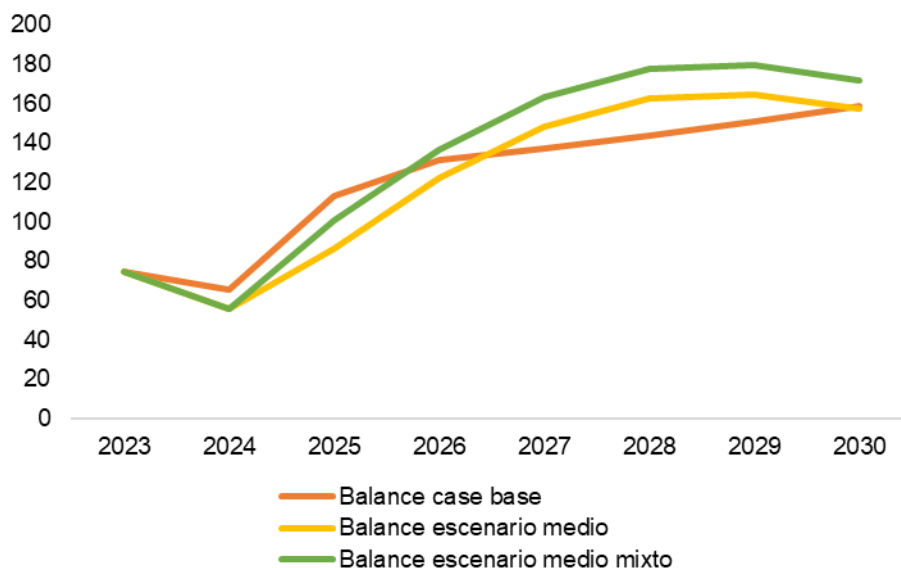


Gráfico 11: comparativa del balance de créditos de carbono en el mercado en el escenario base, escenario de demanda medio, y escenario mixto de oferta y demanda media [millones de créditos]. Fuente: elaboración propia.

Por el contrario, el balance de créditos en el mercado en el escenario mixto de oferta y demanda optimista, tanto el patrón como los valores absolutos son distintos. El valle del balance en el año 2024 desaparece como consecuencia del aumento de las emisiones, lo que permite que el pico del balance en el año 2026 sea prácticamente el doble. De esta forma, la entrada del balance en territorio de cifras negativas se retrasa un año (del 2029 al 2030), reduciéndose además en dos veces y media el valor absoluto de dicha “escasez” de créditos (ver Gráfico 12).

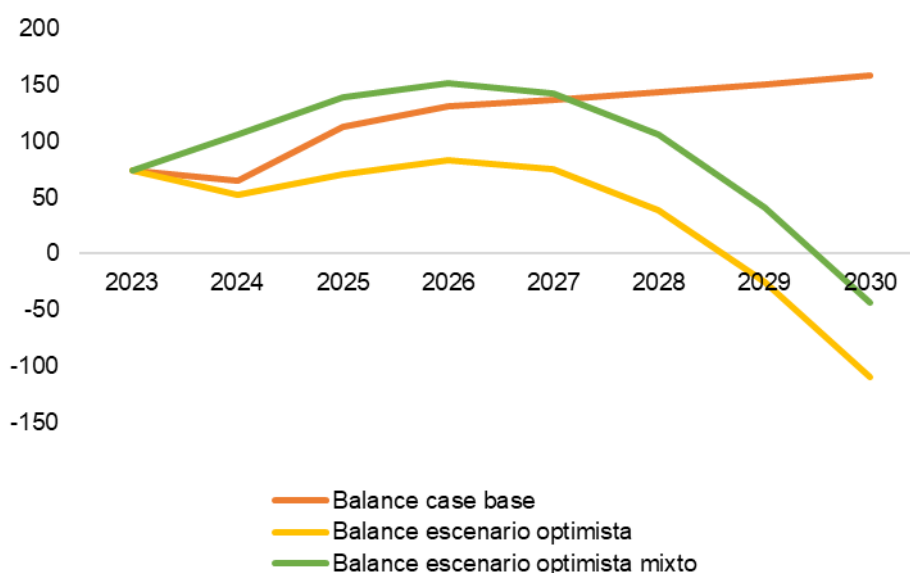


Gráfico 12: comparativa del balance de créditos de carbono en el mercado en el escenario base, escenario de demanda optimista, y escenario mixto de oferta y demanda optimista [millones de créditos]. Fuente: elaboración propia.

Observando el balance total de créditos en la base de datos, de cumplirse las estimaciones de demanda, el modelo tendría todavía un margen de 232 millones de créditos disponibles para emitir en el mercado, por lo que se podría satisfacer la demanda creciente sin problema.

Con estas representaciones en las que el balance del mercado alcanza valores negativos, ligado al margen disponible en la base de datos, se pretende resaltar la posibilidad que se abre a los desarrolladores de proyectos de impactar en el precio de los créditos de carbono, a través de la variación de las emisiones. Gracias a un acceso al mercado con menor nivel de intermediación y con la tecnología necesaria para emitir créditos de forma más rápida, los desarrolladores de proyectos verían como sus beneficios económicos aumentarían considerablemente.

Para entender el impacto económico que estos nuevos modelos de negocio pueden suponer para el mercado voluntario de carbono, es necesario saber que los inversores e intermediarios reciben en la actualidad cerca de un tercio del precio medio de un crédito de carbono (en cifras de 2021, 650 millones de dólares estadounidenses). De esta forma, si el precio medio de un crédito de carbono fue de 4 dólares, quiere decir que el promotor del proyecto recibió aproximadamente cerca de 2,7 dólares por tonelada de CO<sub>2</sub> (Beken, 2022).

De esta forma, y considerando los precios recogidos en la Tabla 5, la evolución de los ingresos en los tres distintos escenarios de demanda queda recogida en el Gráfico 13:

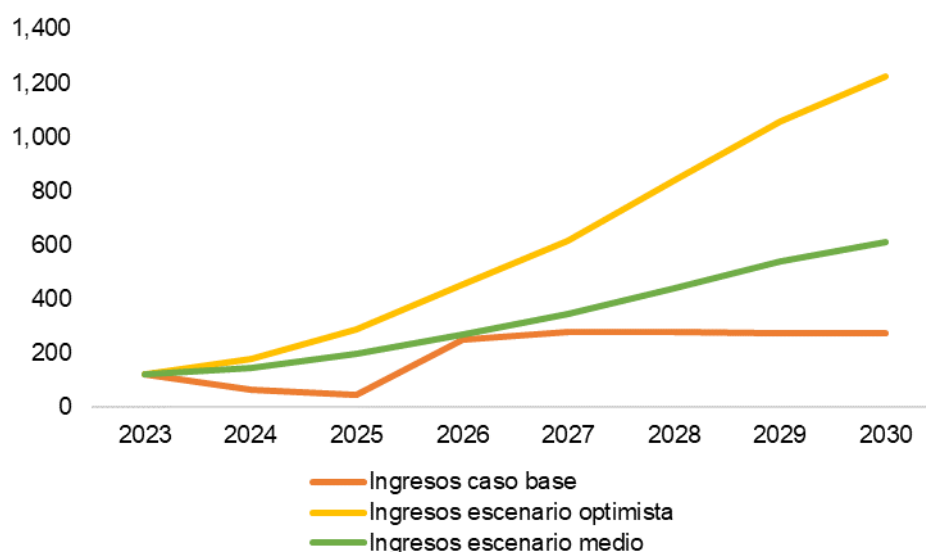


Gráfico 13: ingresos derivados de la venta de créditos de carbono según los distintos escenarios de demanda [millones de dólares]. Fuente: elaboración propia.

Para poder considerar el impacto económico en los beneficios de los promotores de los proyectos, se consideran las hipótesis de reparto de ingresos recogidas en la Tabla 20. Se parte de la hipótesis recogida en el análisis de Thallo (Beken, 2022), que sirven de inspiración para las condiciones recogidas en el escenario medio, y a partir de las cuáles se establecen las condiciones a aplicar en el caso base y en el escenario optimista.

Condiciones	Venta directa (0% de comisión)	Intermediarios con 10% de comisión	Intermediarios que obtienen el 80% del precio final
<b>En caso base</b>	0%	50%	50%
<b>En escenario optimista</b>	50%	45%	5%
<b>En escenario medio</b>	35%	50%	15%

Tabla 20: hipótesis de reparto de ingresos. Fuente: elaboración propia.

El impacto económico de las hipótesis de reparto de ingresos se muestra en el Gráfico 14, donde se puede apreciar el incremento relativo de la proporción de los ingresos que terminan bajo el control del promotor del proyecto. Mientras que, de media, en el escenario base el promotor obtendría un 55% de los ingresos, en el escenario optimista dicho porcentaje alcanzaría el 92% de los ingresos totales. En el escenario medio, dicho porcentaje quedaría limitado al 83%.

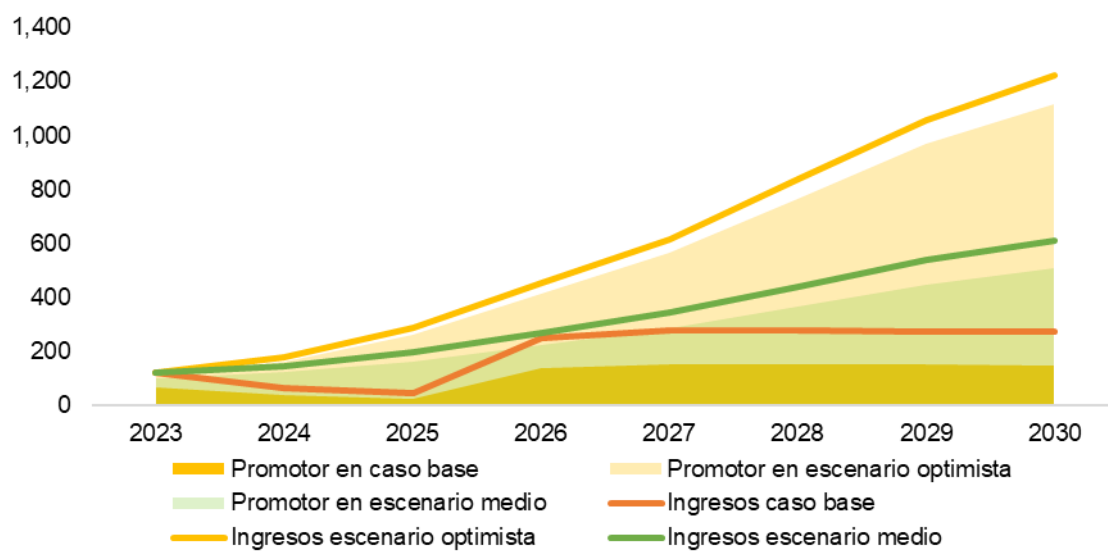


Gráfico 14: proporción de los ingresos que recibe el promotor del proyecto en función del escenario. Fuente: elaboración propia.



## 5. Conclusiones

El mercado voluntario de carbono ha experimentado un gran crecimiento en la última década, lo que le ha permitido establecerse como una opción viable para aquellas organizaciones involucradas en la consecución de objetivos de desarrollo sostenible.

Al margen de los mercados regulados, los agentes que intervienen en el mercado voluntario de carbono han llevado a cabo distintas iniciativas y consultas para encontrar un camino común hacia una nueva etapa de escalabilidad del mercado. En este punto, han entrado en juego distintas soluciones, que pretenden involucrar a agentes de sectores muy distintos alienados ante un mismo objetivo: aumentar el volumen del mercado voluntario de carbono.

Entre las distintas soluciones en desarrollo, los puntos en común pretenden aumentar la eficiencia de los recursos empleados en las actividades de los proyectos, facilitar la entrada al mercado de nuevos agentes, así como aumentar la transparencia en las transacciones.

Para garantizarlo, en el proyecto se han presentado dos soluciones. La primera, la digitalización de la medición, reporte, y verificación. Basada en un modelo *DLT*, esta solución pretende garantizar la interconexión de los agentes del mercado, reduciendo los tiempos necesarios para la emisión de créditos de carbono, así como reducir los costes derivados de las actividades. De esta forma, también se pretende democratizar el acceso a herramientas que en la actualidad están disponibles únicamente para aquellos desarrolladores de proyectos con gran soporte financiero.

La segunda de las opciones pretende garantizar la transparencia del mercado a través de la inclusión de tecnología blockchain, incluyendo la tokenización de los créditos de carbono. Como consecuencia de la implementación de esta tecnología, no solo se facilitaría la señalización de la demanda, sino que los desarrolladores de proyectos verán como su posición en el mercado se refuerza. Gracias a la reducción de la intermediación de bajo valor añadido, los desarrolladores de proyectos serían capaces de prácticamente duplicar la proporción de los ingresos que terminan en su bolsillo.

Es necesario que, una vez determinadas las mejores soluciones posibles para lograr la escalabilidad del mercado, los distintos agentes se pongan de acuerdo para garantizar que la infraestructura necesaria para hacer viable dichas soluciones es implementada en tiempo y forma.

En la actualidad, tanto los gobiernos de los distintos países como las organizaciones privadas están tomando mayor conciencia de la necesidad de establecer objetivos climáticos ambiciosos, comprometiendo recursos futuros en este ámbito. Es necesario que el mercado voluntario de carbono aproveche el *momentum* que se presenta, captando los recursos económicos y humanos necesarios.

Considerando próximos pasos, los agentes principales del mercado voluntario de carbono deben considerar realizar un mayor esfuerzo de divulgación y educación respecto de este, ya que la consecución de los objetivos climáticos depende de la participación del mayor número de agentes posibles. Solo de esta forma se podrá alcanzar el mayor impacto

positivo posible sobre el medio ambiente y las comunidades beneficiadas por los proyectos del mercado voluntario de carbono.

## 6. Bibliografía

Las herramientas y medios empleados durante el desarrollo de este proyecto son, por lo general, fuentes secundarias de información, así como bases de datos de libre acceso. Un número importante de materiales de referencia usados en la primera etapa del proyecto (investigación del estado de la cuestión) han sido suministrados por el director de este proyecto.

De ahí en adelante, el autor ha ido recabando distintas fuentes provenientes de voces autorizadas en la materia. Además, a través de distintos informes de estos, se ha conseguido acceso a bases de datos públicas referenciadas en dichos reportes.

A continuación, se citan los recursos empleados para la redacción de este proyecto:

### 6.1 Referencias

AlliedOffsets. (2023). *Analysis of Voluntary Carbon Market Stakeholders*. AlliedOffsets.

Analytics Insight. (2023, Marzo 13). *Cryptocurrency*. Retrieved from Crypto Coin vs Crypto Token: Understanding the Difference: <https://www.analyticsinsight.net/crypto-coin-vs-crypto-token-understanding-the-difference/#:~:text=Cryptocurrencies%2C%20like%20BTC%20or%20ETH,two%20classes%20of%20digital%20assets>.

Bank of Climate. (2023, Junio 29). *Nuestro enfoque*. Retrieved from Bank of Climate: <https://www.bankofclimate.com/nuestro-enfoque>

Bank of Climate. (2023, Junio 29). *Plataforma*. Retrieved from Bank of Climate: <https://www.bankofclimate.com/plataforma>

Barrat, L., & Sandler Clarke, J. (2022, Mayo 2). Retrieved from Unearthed: <https://unearthed.greenpeace.org/2022/05/02/carbon-offsetting-market-climate/?ref=blog.toucan.earth>

Beken, N. (2022). *FAST FORWARD: CHALLENGES TO SCALING THE VOLUNTARY CARBON MARKET*. Thallo research.

CO2 Revolution. (2023, Marzo 25). *Nuestra solución*. Retrieved from CO2 Revolution: <https://co2revolution.es/nuestra-solucion/>

De Vries, A. (2023). Cryptocurrencies on the road to sustainability: Ethereum paving the way for Bitcoin. *Patterns*, 1.

Digiconomist. (2023, Mayo 9). *Digiconomist*. Retrieved from Ethereum Energy Consumption Index: <https://digiconomist.net/ethereum-energy-consumption>

Dyck, M. S. (2021). *The Voluntary Carbon Market Explained*. Climate Focus.

Ehrlich, S. (2023, Marzo 10). *What Is Web3?* Retrieved from Forbes Digital Assets: <https://www.forbes.com/sites/digital-assets/article/what-is-web3/>

- Forbes. (2023, Marzo 16). *CO2 Revolution cuenta con 250.000 toneladas de CO2 para compensar la huella de carbono de eventos masivos*. Retrieved from Forbes: <https://forbes.es/lifestyle/249529/co2-revolution-cuenta-con-250-000-toneladas-de-co2-para-compensar-la-huella-de-carbono-de-eventos-masivos/>
- Gold Standard. (2022, December 13). *Consultations launched about Digital Verification and Methodologies in the Carbon Market*. Retrieved from <https://www.goldstandard.org/blog-item/consultations-launched-about-digital-verification-and-methodologies-carbon-market>
- Gold Standard. (2022, Agosto 11). *DIGITISING FOR IMPACT*. Retrieved from <https://www.goldstandard.org/our-story/digitising-mrv>
- Gold Standard. (2023, Marzo 15). *Conditions for consenting to tokenisation of Gold Standard-issued credits*. Retrieved from Gold Standard Web site: <https://www.goldstandard.org/our-work/innovations-consultations/conditions-consenting-tokenisation-gold-standard-issued-credits>
- Gold Standard. (2023). *CONDITIONS FOR CONSENTING TO TOKENISATION OF GOLD-STANDARD ISSUED CREDITS. SUMMARY OF CONSULTATION FEEDBACK AND NEXT STEPS*. Gold Standard.
- Grand View Research. (2022). *Crypto Wallet Market Size, Share, & Trends Analysis Report By Wallet Type (Hot Wallet, Cold Wallet), By Operating System (Android, iOS, Others), By Application, By End-use (Individual, Commercial), By Region, And Segment Forecasts, 2022 - 2030*. Grand View Research.
- Hodgson, C. (2022, Mayo 2). *Financial Times*. Retrieved from Surge of investment into carbon credits creates boom time for brokers: <https://www.ft.com/content/739a5517-4de6-43f7-ae47-1ce8d4774d50>
- Investopedia. (2023, Mayo 25). *Decentralized Autonomous Organization (DAO): Definition, Purpose, and Example*. Retrieved from Investopedia: <https://www.investopedia.com/tech/what-dao/#:~:text=A%20DAO%20is%20a%20decentralized,DAO's%20operations%20is%20publicly%20disclosed.>
- Khodai, E. (2022, Diciembre 1). *Toucan Earth*. Retrieved from Tokenization of carbon credits — an explainer: <https://blog.toucan.earth/tokenization-of-carbon-credits-explained/#concerns>
- Khodai, E., & X, J. (2022, Febrero 8). *Toucan Earth*. Retrieved from Introducing NCT: Nature Carbon Tonne: <https://blog.toucan.earth/announcing-nct-nature-carbon-tonne/>
- KlimaDAO. (2023, Junio 23). *Digital Carbon Prices*. Retrieved from KlimaDAO: <https://carbon.klimadao.finance/carbon-pricing>
- KlimaDAO. (2023, Marzo 20). *Introducing KlimaDAO*. Retrieved from KlimaDAO: <https://docs.klimadao.finance/>
- KlimaDAO. (2023, Junio 23). *The State of the Digital Carbon Market*. Retrieved from Carbon KlimaDAO Finance: <https://carbon.klimadao.finance/>



UNFCCC. (2023, Enero 1). *El Acuerdo de París*. Retrieved from Organización de las Naciones Unidas: <https://unfccc.int/es/acerca-de-las-ndc/el-acuerdo-de-paris>

## 7. Apéndices

### 7.1 Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

El Mercado Voluntario de Carbono tiene un gran potencial para alinearse con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, dada la versatilidad de los proyectos, así como el impacto sobre distintas esferas (social, ambiental). En general, los tres objetivos que mejor se alinean con este proyecto son:

- **Objetivo 13 – Acción por el clima:** una de las principales motivaciones para la creación del Mercado Voluntario de Carbono tiene que ver con la voluntad de mitigar y reducir el impacto nocivo de las actividades económicas del ser humano sobre la Tierra. Numerosos proyectos relacionados con el MVC, como pueden ser aquellos de reforestación, pretenden reducir la cantidad de carbono presente en la atmósfera, lo que en definitiva está encaminado a mitigar el impacto que la actividad económica del hombre genera sobre el clima.
- **Objetivo 14 – Vida submarina:** otros proyectos del MVC tienen que ver con la conservación de humedales o manglares, que son considerados como grandes sumideros de CO<sub>2</sub>, promoviendo el mantenimiento de la vida submarina, así como de las reservas naturales de agua.
- **Objetivo 15 – Vida de ecosistemas terrestres:** a través de la lucha contra la deforestación, los proyectos del MVC ayudan a preservar la biodiversidad del planeta Tierra, además de fortalecer la salud de los seres que los habitan.

Como se ha mencionado en capítulos anteriores, los proyectos englobados en el MVC conllevan en numerosos casos efectos secundarios muy positivos para las comunidades localizadas en las cercanías de los lugares donde se desarrollan. Estos efectos positivos están relacionados con otros objetivos como pueden ser:

- **Objetivo 1 – Fin de la pobreza:** gracias a la repercusión positiva en el ámbito económico de los proyectos sobre las comunidades locales de las zonas de desarrollo del proyecto.
- **Objetivo 3 – Salud y bienestar:** como consecuencia de la mejora de las condiciones ambientales y el desarrollo económico producido por los proyectos.
- **Objetivo 8 – Trabajo decente y crecimiento económico:** nuevas oportunidades de trabajo para las personas de dichas comunidades locales.
- **Objetivo 10 – Reducción de las desigualdades:** a modo de beneficio global de la combinación de los tres objetivos mencionados anteriormente.

Otro aspecto importante a tratar en línea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible tiene que ver con la vinculación entre el MVC y el *Acuerdo de París*, el tratado internacional sobre el cambio climático adoptado por 196 partes en la COP21<sup>25</sup> en el año 2015 (UNFCCC, 2023).

El objetivo de este acuerdo es limitar el calentamiento mundial por debajo de los 2°C y, preferiblemente, a 1,5°C, en comparación con los niveles preindustriales. La aplicación del Acuerdo funciona a través de un ciclo de cinco años con medidas cada vez más ambiciosas. A los planes de acción climática de cada país se les denomina contribuciones determinadas a nivel nacional (NDC, por sus siglas en inglés).

De esta forma, aunque el mercado voluntario de carbono esté administrado por estándares privados, existe cierta vinculación entre el Acuerdo de París y el MVC, ya que las actividades de los proyectos del MVC pueden ayudar a los países a alcanzar sus contribuciones determinadas a nivel nacional (NDC) establecidas bajo el Acuerdo de París.

Algo muy relevante en este aspecto tiene que ver con el Artículo 6 del Acuerdo de París y la flexibilidad que este ofrece a los gobiernos para alcanzar sus objetivos climáticos. Gracias a la mayor cooperación entre países, las reducciones y captura de emisiones pueden ser transferidas entre países.

En un caso hipotético, un país A posee los recursos necesarios para reducir sus emisiones base (BAU, *Business-as-usual*) en un 50%. Por tanto, sus emisiones netas en un intervalo determinado serán de 50 unidades métricas. Otro país B, emite unas emisiones BAU de 120 unidades métricas, y solo es capaz de reducir en 20 unidades. De esta forma, reportará unas emisiones netas de 100 unidades métricas.

En lo que a objetivos climáticos se refiere, el país A tiene una meta de 80 unidades métricas, mientras que el país B las desea limitar a las 70 unidades. Gracias al Artículo 6 del Acuerdo de París, el país B podrá adquirir 30 unidades de reducciones de emisiones del país A, que serán transferidas (ITMO, *Internationally Transferable Mitigation Outcomes*) y contabilizadas en las emisiones finales ajustadas del país B. Por tanto, el saldo final de emisiones del país A será de 80 unidades, mientras que el del país B será de 70 unidades, siendo ambos capaces de cumplir sus NDCs.

Este proceso queda explicado en la Ilustración 20:

---

<sup>25</sup> COP: Conferencia de las Partes (*Conference of the Parties*, en inglés).



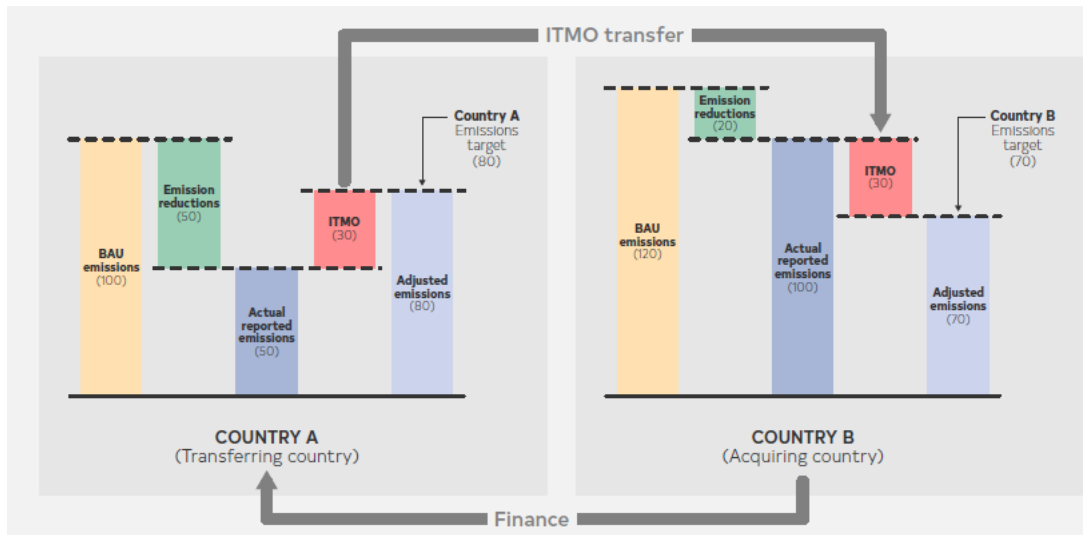


Ilustración 20: ajuste de emisiones transferidas entre países. Fuente: (Dyck, 2021).

En conclusión, los proyectos del mercado voluntario de carbono que generan un valor añadido más allá de los meros objetivos del proyecto consiguen un impacto positivo en las comunidades locales que genera una fuerza transformadora para la sociedad. Este impacto positivo en la sociedad y en el medio ambiente son contribuciones netas positivas al Acuerdo de París, incluso si los créditos se utilizan para compensar emisiones. En este sentido, algunos registros de carbono incluyen una etiqueta en los créditos de carbono que emiten reconociendo su contribución a la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

## 7.2 Base de datos de *Berkeley Carbon Trading Project (BCTP)*

A continuación, a modo de ejemplo, se presenta la información de las primeras 14 columnas de los primeros 33 proyectos incluidos en la base de datos empleada en el proyecto (So, Haya, & Elias, 2023):

Project ID	Project Name	Voluntary Registry	ARB Project	Voluntary Status
ACR101	AFOVERT Energy	ACR	No	Canceled
ACR102	Air Bag Gas Substitution	ACR	No	Completed
ACR103	Inland Empire Anaerobic Ag Digester	ACR	No	Completed
ACR104	Ankotrofotsy Community-based Reforestation and Carbon Offset Project, Menabe region, Madaga	ACR	No	Inactive
ACR105	Boa Vista A/R	ACR	No	Canceled
ACR106	Brickyard LFG to Energy	ACR	No	Completed
ACR107	Camargo Fuel Substitution	ACR	No	Completed
ACR108	San Juan National Forest Carbon Demonstration Project	ACR	No	Canceled
ACR109	Chesapeake Mizer Pneumatic Retrofit	ACR	No	Completed
ACR110	Chicago LFG to Energy	ACR	No	Completed
ACR111	Devon Mizer Pneumatic Retrofit	ACR	No	Completed
ACR112	Dolton LFG to Energy	ACR	No	Completed
ACR113	Greater New Bedford LFG	ACR	No	Completed
ACR114	GreenTrees ACRE (Advanced Carbon Restored Ecosystem)	ACR	No	Registered
ACR115	Lower Mississippi Valley Reforestation	ACR	No	Registered
ACR116	Societe VERAMA Madagascar Afforestation Project	ACR	No	Inactive
ACR117	Merit Energy Geo-Seq	ACR	No	Completed
ACR118	Monell Geo-Seq	ACR	No	Completed
ACR119	North Country LFG	ACR	No	Completed
ACR120	Petrosource Geo-Seq	ACR	No	Completed
ACR121	Pike's Peak Geo-Seq	ACR	No	Completed
ACR122	Romeoville LFG to Energy	ACR	No	Completed
ACR123	Salt Creek Geo-Seq	ACR	No	Completed
ACR124	Schneider Anti-Idling	ACR	No	Completed
ACR125	SEESA Solar Electrification	ACR	No	Completed
ACR126	Seneca Meadows LFG	ACR	No	Completed
ACR127	Steuben County DPW LFG	ACR	No	Completed
ACR128	Streator LFG to Energy	ACR	No	Completed
ACR129	Tecnosol Solar Electrification	ACR	No	Completed
ACR130	Truck Stop Electrification, Alabama	ACR	No	Completed
ACR131	Truck Stop Electrification, Arizona	ACR	No	Completed
ACR132	Truck Stop Electrification, Arkansas	ACR	No	Completed
ACR133	Truck Stop Electrification, California	ACR	No	Completed

Tabla 21: muestra de los datos empleados en el proyecto (1/3). Fuente: (So, Haya, & Elias, 2023).

Reduction / Removal	Methodology / Protocol	Region	Country
Reduction	AMS-I.E. Switch from Non-Renewable Biomass for Thermal Applica	Sub Saharan Africa	Mali
Reduction	Emission reductions through industrial gas substitution	North America	United States
Reduction	Anaerobic Digestion	North America	United States
Impermanent Removal	AR-ACM0001	Sub Saharan Africa	Madagascar
Impermanent Removal	AR-ACM0001	South America	Brazil
Reduction	Monitoring, Reporting and Verification Protocol for Landfill Gas Co	North America	United States
Reduction	Fuel switching from coal and/or petroleum fuels to natural gas in e	South America	Bolivia
Impermanent Removal	AR-ACM0001	North America	United States
Reduction	Conversion of High-Bleed Pneumatic Controllers in Oil and Natural	North America	United States
Reduction	Monitoring, Reporting and Verification Protocol for Landfill Gas Co	North America	United States
Reduction	Conversion of High-Bleed Pneumatic Controllers in Oil and Natural	North America	United States
Reduction	Monitoring, Reporting and Verification Protocol for Landfill Gas Co	North America	United States
Reduction	Monitoring, Reporting and Verification Protocol for Landfill Gas Co	North America	United States
Impermanent Removal	Afforestation and Reforestation of Degraded Lands	North America	United States
Impermanent Removal	AR-ACM0001	North America	United States
Impermanent Removal	AR-ACM0001	Sub Saharan Africa	Madagascar
Reduction	Emission Reductions from Enhanced Oil Recovery	North America	United States
Reduction	Emission Reductions from Enhanced Oil Recovery	North America	United States
Reduction	Monitoring, Reporting and Verification Protocol for Landfill Gas Co	North America	United States
Reduction	Emission Reductions from Enhanced Oil Recovery	North America	United States
Reduction	Emission Reductions from Enhanced Oil Recovery	North America	United States
Reduction	Monitoring, Reporting and Verification Protocol for Landfill Gas Co	North America	United States
Reduction	Emission Reductions from Enhanced Oil Recovery	North America	United States
Reduction	Emissions Reductions though Anti-Idling Technologies	North America	United States
Reduction	Electricity generation by the user	Central America	El Salvador
Reduction	Offset Project Methodology for Landfill Methane Collection and Co	North America	United States
Reduction	Monitoring, Reporting and Verification Protocol for Landfill Gas Co	North America	United States
Reduction	Monitoring, Reporting and Verification Protocol for Landfill Gas Co	North America	United States
Reduction	Electricity generation by the user	Central America	Nicaragua
Reduction	Emissions Reductions though Anti-Idling Technologies	North America	United States
Reduction	Emissions Reductions though Anti-Idling Technologies	North America	United States
Reduction	Emissions Reductions though Anti-Idling Technologies	North America	United States
Reduction	Emissions Reductions though Anti-Idling Technologies	North America	United States

Tabla 22: muestra de los datos empleados en el proyecto (2/3). Fuente: (So, Haya, & Elias, 2023).

State	Project Site Location	Project Developer
Niono District	Niono	Katene Kadji
OREGON	Beaverton	Nike
CALIFORNIA	Chino	Inland Empire Utilities Agency
Miandrivazo	Ankotrofotsy	Tany Meva Foundation
Roraima	Boa Vista	F.I.T Timber Ltd
ILLINOIS	Danville	Biogas Energy Solutions
Nor Ciniti	Camargo	E+Co
COLORADO	Columbine Ranger Distric	National Forest Foundation
OKLAHOMA	Oklahoma, Texas, New M	Chesapeake Energy
ILLINOIS	Chicago	Biogas Energy Solutions
OKLAHOMA	Oklahoma, Texas, Wyomi	Devon Energy Group
ILLINOIS	Dolton	Biogas Energy Solutions
MASSACHUSETTS	Dartmouth	Commonwealth Resource Management C
ARKANSAS	Mississippi Alluvial Valley	GreenTrees, LLC
LOUISIANA	National Wildlife Refuges	Entergy Services, Inc
Antonibe	Masiloka Peninsula	Societe VERAMA
WYOMING	LaBarge	Blue Source
WYOMING	Sweetwater County	Anadarko
NEW HAMPSHIRE	Bethlehem	Commonwealth Resource Management C
TEXAS	Crocket County	Blue Source
TEXAS	Pecos County	Blue Source
ILLINOIS	Romeoville	Biogas Energy Solutions
WYOMING	Salt Creek Field, Natrona	Anadarko
WISCONSIN		Blue Source
	El Salvador	E+Co
NEW YORK	Waterloo	Seneca Meadows
NEW YORK	Bath	Environmental Capital LLC
ILLINOIS	Streator	Biogas Energy Solutions
	Nicaragua	E+Co
ALABAMA	Alabama	IdleAir
ARIZONA	Arizona	IdleAir
ARKANSAS	Arkansas	IdleAir
CALIFORNIA	California	IdleAir

Tabla 23: muestra de los datos empleados en el proyecto (3/3). Fuente: (So, Haya, & Elias, 2023).