

04-018

TECHNICAL ASPECTS OF CARBON SEQUESTRATION FORESTRY PROJECT

Pérez Cruzado, Cesar ⁽¹⁾; Bruña-García, Xabier ⁽²⁾; Seoane Conde, Inés ⁽¹⁾; Rodríguez Ruíz, Joel ⁽¹⁾;
Marey Pérez, Manuel Francisco ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Universidad de Santiago de Compostela, ⁽²⁾ Xunta de Galicia

Various forestry-related activities have been implemented since the implementation of the Kyoto Protocol to offset carbon emissions, known as carbon sequestration projects. Since the Paris Conference of the Parties, these projects can be implemented within the same country, which has aroused enormous investment interest from European and U.S. sectors that are major emitters. This interest is not without controversy, since some sectors have warned about conflicts with other land uses, lack of transparency in economic and technical aspects, lack of integration with national emissions estimates, and the externalities that this type of projects may have. This paper presents the main types of forest carbon sequestration projects and their technical characteristics, distinguishing the following typologies: i) afforestation, reforestation and land use change projects (LULUCF), ii) projects to reduce deforestation and forest degradation and promote sustainable forest management (REDD+), and iii) forest management projects oriented to carbon sequestration (IFM). Finally, the Spanish market options for the implementation of these projects are discussed.

Keywords: projects; offsetting mechanisms; GHGs; NDCs; MRV

ASPECTOS TÉCNICOS DE LOS PROYECTOS FORESTALES DE CAPTURA DE CARBONO

Distintas actividades relacionadas con el ámbito forestal se han venido implementando desde la puesta en marcha del Protocolo de Kioto para compensar emisiones de carbono, lo que se conoce como proyectos de captura de carbono. Desde la Conferencia de las Partes de París, estos proyectos pueden ser implementados dentro del mismo país, lo que ha despertado un enorme interés inversor de sectores europeos y estadounidenses netamente emisores. Este interés no está exento de controversia, ya que desde algunos sectores se alerta sobre los conflictos con otros usos del suelo, falta de transparencia en aspectos económicos y técnicos, falta de integración con las estimaciones nacionales de emisiones, y de las externalidades que pueden tener este tipo de proyectos. En el presente trabajo, se presentan los principales tipos de proyectos forestales de captura de carbono, así como sus características técnicas, distinguiendo las siguientes tipologías: i) proyectos de aforestación, reforestación y cambio de uso del suelo (LULUCF), ii) proyectos de reducción de la deforestación y de la degradación forestal y promoción de la gestión forestal sostenible (REDD+), y iii) proyectos de gestión forestal orientada al secuestro de carbono (IFM). Finalmente, se discuten las opciones del mercado español para la implementación de estos proyectos

Palabras clave: proyectos; mecanismos de compensación; GHGs; NDCs; MRV

Agradecimientos: Xunta de Galicia por su apoyo financiero con una subvención para Grupos Competitivos de Referencia ED431C-2021-27



© 2023 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

El cambio climático se encuentra actualmente entre las principales preocupaciones de la sociedad, ya que sus efectos sobre el medio son ya observables a la escala temporal humana en gran parte del planeta. Esta conciencia sobre el problema es en gran medida debida a que se asume que los escenarios de aumento de temperaturas y ocurrencia de fenómenos climatológicos extremos son ya irreversibles (IPCC, 2022), aunque se tomen medidas de forma inmediata y contundente en la reducción de emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI). A pesar de ello, la no actuación supondría unas consecuencias de mayor intensidad e impacto sobre el planeta, por lo que los distintos acuerdos internacionales urgen a una acción conjunta de todos los países, así como transversal a todos los sectores económicos.

A pesar de que son varios los GEI que contribuyen al cambio climático, es sobre el CO₂ sobre el que se dirige la mayor atención. Ello es debido a que: i) es el gas mayoritario en términos de emisiones, ii) proviene fundamentalmente de fuentes fósiles, que se han encontrado fuera de la circulación biogeoquímica durante millones de años, y iii) existen procesos naturales que fijan el CO₂ atmosférico, como es el caso de la fotosíntesis. Sin embargo, existen muchos otros gases que contribuyen al efecto invernadero, algunos de ellos con potenciales de calentamiento global muy superiores al del CO₂ (IPCC, 2019), pero sobre los que o bien no existe capacidad de actuación desde el secuestro, o su contenido en la atmósfera es reducido, por lo que en términos de compensación de emisiones se suele trabajar en toneladas de CO₂ equivalente (CO₂e). Esta diversidad en los GEI origina que la estrategia para la mitigación del cambio global sea distinta en función del tipo de gas, pasando exclusivamente de estrategias de reducción de emisiones para aquellos gases que no pueden ser capturados mediante procesos naturales o artificiales, a actuaciones combinadas de reducción de emisiones y fomento del secuestro y acumulación para aquellos en los que estas actuaciones son viables. Estas premisas de actuación son las que han guiado el desarrollo de una estrategia internacional coordinada de reducción de GEI.

El primer intento internacional de actuar conjuntamente sobre los GEI ocurrió con la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC) de Kioto (UNFCCC, 1997). En esta cumbre se establecieron los niveles de referencia de emisiones de GEI de los países, y los compromisos y plazo para reducción sobre los anteriores, así como numerosos aspectos técnicos sobre los mecanismos de compensación de emisiones. Los compromisos de reducción se basan en los inventarios de GEI realizados por los países (IPCC, 2019), los cuales desglosan las emisiones y capacidad de secuestro por sectores, y se acompañan por un sistema de créditos de emisión, que son comercializables entre las entidades obligadas a reducir sus emisiones, lo que se conoce como mercado obligatorio. En paralelo existe un mercado voluntario de compensación de emisiones de GEI, al que las entidades interesadas en compensar sus emisiones pueden recurrir para ofertar bienes o servicios libres de emisiones, en la mayor parte de los casos por responsabilidad social corporativa.

La generación de los créditos que permiten compensar emisiones se realiza en base a mecanismos se centran en actuar sobre: i) reducción de las emisiones de GEI a la atmósfera, y ii) fomento de actuaciones de secuestro de GEI atmosférico. Dentro del primer grupo se encuentran actividades que tienen por objetivo la sustitución de fuentes de energía fósiles por renovables, el aumento de la eficiencia en el uso energético, y la sustitución de materiales para cuya producción sea necesaria la emisión de grandes cantidades de GEI por otros con balances mas favorables, entre otras actividades. En el segundo grupo estarían aquellas actividades que suponen una actuación directa sobre los GEI

atmosféricos, reduciéndolos mediante procesos biogénicos o artificiales, y acumulándolos en reservorios naturales o artificiales durante un determinado periodo de tiempo.

Estos mecanismos se articulan en forma de proyectos de captura de carbono, que en sus orígenes permitían compensar emisiones a países desarrollados mediante actuaciones en países en vías de desarrollo, asumiendo de esta forma que los países menos desarrollados debían disponer de margen para desarrollar sus economías (mediante unos compromisos de reducción de emisiones menos ambiciosos) y con unas ayudas directas por parte de los países desarrollados para implementar actuaciones de secuestro de carbono (que servirían a su vez a los países desarrollados para compensar parte de sus emisiones). Es después de la Conferencia de las Partes de París (UNFCCC, 2015) cuando se establece que los países desarrollados pueden implementar proyectos de captura de carbono en sus propios territorios, en parte debido a problemas de objetividad, transparencia y verificidad del carbono acumulado en algunos proyectos concretos (Greenfield, 2023), así como a externalidades negativas originadas por la implementación, como conflictos con poblaciones locales (Alusiola et al. 2021) o deforestación secundaria (Schwarze et al. 2002). Este cambio en la normativa ha despertado un elevado interés sobre los proyectos de captura de carbono en Europa y América del norte, tanto como vía para lograr unos balances más favorables en los inventarios de gases de efecto invernadero de los países (IPCC, 2019), como para la comercialización de créditos de carbono en el mercado voluntario.

El presente trabajo se centra en los proyectos forestales de captura de carbono. Definiremos proyecto forestal como aquel que supone una transformación en monte, dejando fuera de este modo otros que, pudiendo derivarse del sector forestal por su vínculo con los productos o con la industria forestal, su actividad principal ocurre fuera del medio forestal.

2. Objetivos

El objetivo de la presente comunicación es la revisión sobre los aspectos técnicos de los proyectos forestales de captura de carbono, haciendo énfasis en aquellos temas más relacionados con la dirección de proyectos.

3. Los proyectos forestales de captura de carbono

A continuación se resumen las principales características de los proyectos forestales de captura de carbono, desarrollando algunos aspectos técnicos relacionados con el ámbito de la dirección de proyectos. Un elemento común a todos los proyectos forestales son los periodos relativamente largos de los procesos productivos. En comparación con los cultivos agrícolas, donde los ciclos de producción son anuales para la mayor parte de las alternativas de producción, en el ámbito forestal los ciclos más cortos se corresponden con plantaciones energéticas, con turnos de 3-5 años, y los característicos de especies de crecimiento lento son de varios cientos de años. Las productividades forestales en términos anuales son, por lo tanto, de una entidad bastante menor que en el caso de los cultivos agrícolas, por lo que cobra una importancia mayor la planificación a largo plazo y con enfoques predictivos, así como una adecuada evaluación, planificación y riesgos. Los mercados de carbono servirían para aumentar la rentabilidad de las producciones forestales, y ayudarían a aumentar la frecuencia de ingresos, ya que en el caso de algunos de los ciclos forestales, no se producirían ningún tipo de ingreso hasta la corta final. Sin embargo, un aspecto interesante de los proyectos forestales de carbono es la elevada superficie potencial que existe en el territorio para su implementación, ya que según los datos del último Inventario Forestal Nacional el porcentaje de España cubierto por bosques es del 51.9 %, de los cuales un 29.1% son arboladas (MITECO, 2023).

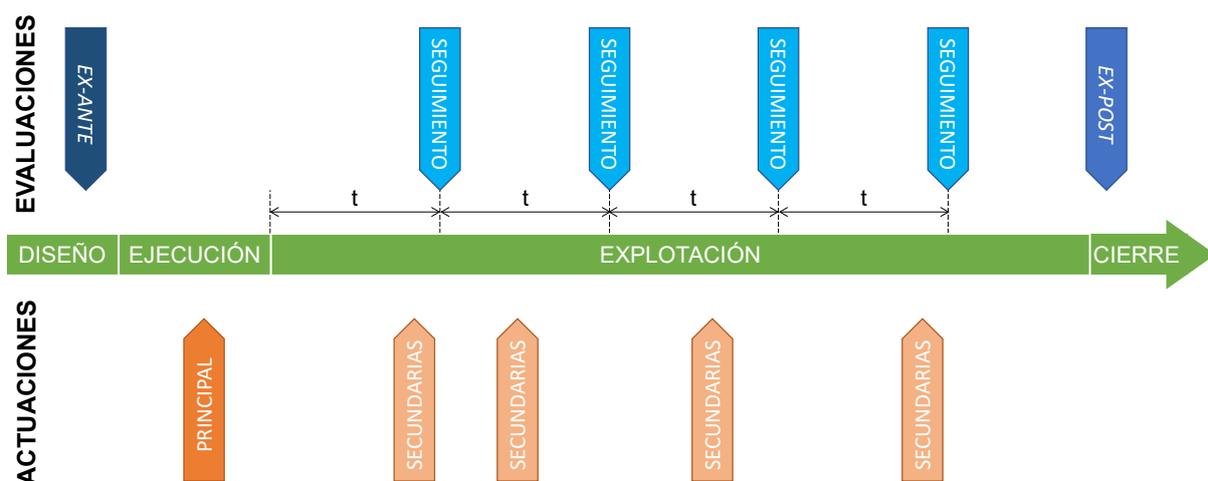
3.1 Tipologías de proyectos

Como ya se ha comentado en el apartado de introducción, en este trabajo nos centraremos en aquellos proyectos de captura de carbono que suponen una actuación en monte, dejando fuera a aquellos que, pudiendo estar vinculados con el uso productos forestales o con la industria forestal, el efecto de secuestro o captura de carbono no ocurre en monte. A modo de resumen, se clasifican las tipologías de proyectos forestales de carbono en los siguientes tipos:

Proyectos de reforestación o aforestación (PRA). Consideraremos en este grupo a todos los proyectos cuya actuación principal consista en la conversión en bosques de terrenos que anteriormente no lo eran (aforestación) o de terrenos que anteriormente lo eran pero que por algún motivo han dejado de serlo (reforestación). Se encontrarían dentro de este grupo los proyectos al amparo de las actividades conocidas como LULUCF (Land Use Land Use Change and Forestry), actuaciones habituales desde la entrada en vigor de los mecanismos de desarrollo limpio de Kioto (UNFCCC, 1997) hasta la reciente modificación de la Conferencia de las Partes de París (UNFCCC, 2015). Fuera del mercado regulado, este tipo de proyectos también han tenido su reflejo en el mercado voluntario nacional, como es el caso del Real Decreto 163/2014, donde se contemplan dos tipologías para los proyectos PRA, dependiendo si la reforestación tiene lugar sobre terrenos incendiados o rasos que hayan sido repoblados con posterioridad a 2012.

Desde el punto de vista técnico, estos proyectos se resuelven como repoblaciones forestales, siendo esta la transformación principal que se realiza durante la fase de ejecución del proyecto (Figura 1). Existen actuaciones secundarias también durante la fase de explotación del proyecto, que tienen por objetivo asegurar el adecuado desarrollo de la plantación, reducir el riesgo de fracaso por riesgos previsibles, o maximizar el secuestro de carbono en los distintos compartimentos elegibles (ver apartado 3.3). Para el caso concreto de los proyectos PRA, estas actuaciones serían reposiciones de marras, fertilizaciones, desbroces, podas, claras y clareos y tratamientos fitosanitarios y control biológico, entre otras actuaciones.

Figura 1: Momentos en los que operan las evaluaciones de carbono y las actuaciones para los proyectos PRA y PGFM de captura de carbono



Proyectos de gestión forestal mejorada (PGFM). Consideraremos en este grupo a aquellos proyectos que tienen por objetivo actuaciones sobre terrenos forestales arbolados que permanecerán siéndolo después de la intervención, pero con un nivel de stock o efecto

sumidero de C mejorado con respecto a las condiciones previas a la intervención. Estos mecanismos se comenzaron a emplear en el mercado internacional después de la Conferencia de las Partes de Bali (UNFCCC, 2007) con el nombre de proyectos REDD+ (acrónimo en inglés de Reducción de la Deforestación y de la Degradación Forestal, y Gestión Forestal Sostenible). En el origen de estos mecanismos se encontraba, entre otros motivos, la problemática surgida con la proliferación de proyectos PRA en países en vías de desarrollo y el desplazamiento de determinados usos a áreas forestales, con la consiguiente aparición de problemas de degradación forestal y de pérdida de superficie forestal (Schwarze et al. 2002). A pesar de que no se pueda decir que esta sea la situación en las zonas más industrializadas, la Conferencia de las Partes de París (UNFCCC, 2015) amplió las zonas de posible aplicación de este tipo de proyectos a todos los países, dejando libertad para su inclusión en las estrategias nacionales de reducción de emisiones, lo que se ha venido a llamar *Nationally Determined Contributions* (NDCs). Esta inclusión se justifica por el potencial que presenta la gestión forestal para el secuestro de carbono, algo que puede ser optimizado con ligeras modificaciones de las actuaciones selvícolas habituales para la producción de madera (Pérez-Cruzado et al. 2012a). Algunos países industrializados se encuentran ya en la fase de desarrollo de normativa para la implementación de proyectos PGFM dentro del territorio nacional. Este es el caso de Portugal, con un Decreto Ley que actualmente se encuentra en periodo de exposición pública, y que tiene por objetivo el desarrollo de un mercado nacional voluntario y la regulación de proyectos de captura de carbono.

Existe una muy elevada diversidad de actuaciones técnicas que se pueden realizar en masas arboladas para la optimización del secuestro de carbono, y que se podrían considerar como gestión forestal mejorada (PGFM). Esta diversidad tiene que ver con las características de la masa antes de la implementación del PGFM, con el estado de desarrollo de la masa en ese momento, y con los compartimentos elegibles para el cómputo (ver apartado 3.3). En todo caso, y como aspecto común a todos los PGFM, se podría decir que se trata de transformaciones de menor entidad que en el caso de los PRA, y más distribuidas durante el periodo de explotación. Algunos ejemplos de actuaciones serían plantaciones de refuerzo en zonas con densidades defectivas, optimización del stock en biomasa viva o de la producción de determinado tipo de productos al final de turno, dependiendo del compartimento que más importancia tenga en el cómputo.

3.2 Evaluación del carbono acumulado en los proyectos

Un aspecto común a los proyectos PRA y PGFM es la temporalización de la cuantificación del carbono secuestrado en relación al ciclo del proyecto, pudiendo distinguir entre: i) evaluación *ex-ante*, ii) evaluaciones de seguimiento, y iii) evaluaciones *ex-post* (Figura 1). Normalmente, estas evaluaciones están ligadas a momentos en los que se comercializan los créditos de carbono generados por los proyectos, y son varias las fuentes de información y metodologías que se realizan en cada caso. A continuación se detallan algunas características de las evaluaciones anteriormente citadas.

La evaluación *ex-ante* se realiza durante la fase de diseño del proyecto (Figura 1), y los aspectos metodológicos concretos sobre las características de la misma varían en función de la información disponible para el área de estudio. En el mejor de los casos, se dispondrá de información de crecimientos y producciones para la especie forestal que se instalará en el proyecto de captura de carbono, lo que permitirá una estimación precisa del carbono acumulado al final del proyecto. En el caso más desfavorable, será necesario estimar la productividad del sitio mediante métodos indirectos, o mediante la toma de asunciones sobre la calidad de estación. En función de los valores que arroje esta evaluación, tanto sobre el valor absoluto del carbono acumulado al final del proyecto como de la incertidumbre sobre el anterior, el promotor decide sobre si procede la inversión y por lo tanto se pasa a la

fase de ejecución. Estas evaluaciones *ex-ante* se realizan habitualmente mediante el uso de modelos de crecimiento empíricos y/o eco-fisiológicos (Pérez-Cruzado et al. 2012a). Algunos mecanismos concretos contemplan la venta de parte de los créditos de carbono en base al resultado esta evaluación, como es el caso de los proyectos registrados al amparo de la normativa nacional RD 163/2014. Este es un aspecto interesante para el fomento de la implementación de este tipo de proyectos, debido a que el ciclo productivo de los productos forestales se caracteriza por los dilatados periodos de tiempo que ocurren entre la acometida de la inversión inicial y la generación de ingresos.

Durante la fase de ejecución del proyecto se realizan evaluaciones periódicas de seguimiento (Figura 1), que servirán para comercializar créditos de carbono. Estas evaluaciones consisten en inventarios forestales clásicos, basados en la medición de parcelas de campo o en su combinación con información de teledetección mediante el uso de metodologías de inferencia basadas o asistidas por modelos (Gregoire & Valentine, 2007). Un aspecto técnico muy importante a dimensionar en estos proyectos es el intervalo de tiempo entre mediciones, lo que se muestra como t en la Figura 1. El valor de t debe ser lo suficientemente reducido como para asegurar una distribución lo más uniforme y distribuida posible de la emisión de los créditos de carbono, pero lo suficientemente grande para asegurarse de que los errores de medición, así como otras fuentes de incertidumbre, son lo suficientemente reducidas en relación al incremento del valor del carbono entre mediciones. La determinación precisa del intervalo entre mediciones suele realizarse mediante análisis de propagación de errores (Pérez-Cruzado et al. 2017), en los que se evalúa la contribución de distintas fuentes a la incertidumbre total de las estimaciones. Los créditos de carbono a certificar en cada evaluación de seguimiento se corresponden con los acumulados desde la última evaluación.

La evaluación *ex-post* tiene lugar a la finalización del periodo de explotación del proyecto, y tiene por objetivo la certificación final de los créditos acumulados desde la última evaluación de seguimiento, así como demostrar a las partes interesadas y al público en general los logros de los objetivos de captura de carbono. Es una herramienta muy importante para el aprendizaje sobre cuantificación de emisiones en futuros proyectos, ocurrencia e impacto de riesgos durante las fases de ejecución y explotación del proyecto, así como efecto de acciones correctoras que eventualmente se hayan tomado.

3.3 Compartimentos considerados y proceso de estimación

La referencia científica y técnica sobre los compartimentos en los que el carbono puede ser acumulado por el efecto de la transformación que se describe en el proyecto son las guías para inventarios de gases de efecto invernadero del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, 2019). En esta referencia se encuentran todos los detalles metodológicos sobre los procesos de estimación para distintos escenarios, desde aquellos en los que por la escala de estimación o disponibilidad de información se requiere de métodos simplificados (como sería el caso de inventarios regionales o nacionales, o aquellos realizados a menor escala pero que no se disponga de las capacidades ni información local para la estimación), a otros en los que se requiera un nivel de detalle muy alto (como sería el caso para proyectos de captura de carbono a escala local). De forma general, los compartimentos considerados para la cuantificación del carbono acumulado por la acción del proyecto son: i) la biomasa viva, ii) la biomasa muerta, iii) el suelo, y iv) los productos. A continuación se detallan algunos aspectos técnicos sobre cada compartimento.

La biomasa viva se refiere al material vegetal cuyo crecimiento es atribuible a la implantación del proyecto. Habitualmente se refiere únicamente al estrato arbóreo, pero existen metodologías que consideran también el matorral y el estrato herbáceo. La estimación del carbono acumulado en este compartimento se realiza mediante la realización de mediciones dasométricas y la aplicación de ecuaciones de biomasa o tarifas de

cubicación, y su posterior transformación a valores de carbono mediante la aplicación de la concentración de carbono en biomasa o el uso de un factor de conversión desde volumen (Pérez-Cruzado & Rodríguez-Soalleiro, 2011). Este es el compartimento sobre el que existe un mayor margen de gestión en los proyectos forestales de captura de carbono, y también el que habitualmente suele suponer un mayor porcentaje del carbono acumulado al cierre del proyecto.

La biomasa muerta se refiere al material vegetal que, bien por procesos naturales o como resultado intencionado de la gestión, se deposita en el monte en forma de material vegetal muerto, sin previsiones de hacer aprovechamiento sobre el mismo. La deposición de este material puede ocurrir en cualquier momento dentro del periodo de explotación, y en su cuantificación deben de tenerse en cuenta los procesos de descomposición que suponen una liberación de carbono a la atmósfera, o su incorporación al suelo mineral, lo que complica el proceso de estimación (Collepari et al. 2020). Una forma de proceder en la evaluación del carbono contenido en este compartimento es la definición de clases de decaimiento (descomposición) para elementos de distintos tamaños y la determinación del contenido en carbono por unidad de peso característico de esa clase, y la aplicación de métodos de muestreo de madera muerta basados en intercepción o intersección de elementos lineales (Gregoire & Valentine, 2007) para la estimación del peso total de cada clase de decaimiento. Es habitual que se establezca un tamaño mínimo del elemento para ser considerado en el cómputo, de forma que los elementos más finos del material vegetal muerto (también conocido como mantillo) se cuantifiquen en el compartimento de suelo.

En el compartimento suelo se considera al carbono acumulado en forma de compuestos orgánicos. No se considera en el cómputo el carbono mineral, debido a que su acumulación se produce a mayor escala temporal, y por lo tanto no puede ser atribuido a la acción del proyecto. Nótese en este punto la diferencia entre el carbono orgánico que se encuentra en el complejo órgano-mineral del suelo, del carbono mineral que se encontraría únicamente en la parte mineral, habitualmente en forma de carbonatos u otros compuestos minerales. Las estimaciones de carbono en el suelo se realizan mediante el uso de valores de concentración de carbono en el suelo, densidad aparente, pedregosidad y profundidad de suelo (Pérez-Cruzado et al. 2012b). Se ha de tener en cuenta en este tipo de estimaciones, que tanto la densidad aparente como la pedregosidad y la concentración de carbono varían en profundidad, de forma que la estimación de carbono en este compartimento tiene unas mayores incertidumbres asociadas que para el resto de compartimentos. Además, la capacidad de la actuación del proyecto para modificar los valores de carbono en el suelo es muy limitada (Pérez-Cruzado et al. 2012a), motivo por el que algunos mecanismos no consideran la cuantificación del carbono en este compartimento en los procesos de estimación.

El compartimento de productos considera el carbono acumulado en bienes y servicios generados por la transformación que se describe en el proyecto. De forma genérica se referiría a los derivados por el uso de la madera, pero podrían referirse también a otros productos forestales. Habría dos procesos mediante los cuales se podrían generar créditos de carbono en los productos: i) por el carbono retenido en los productos en si mismos, y ii) por el efecto sustitutivo de consumir productos forestales y por lo tanto dejar de consumir otros que presentan unos balances de carbono más desfavorables. La cuantificación del carbono en el primer caso se haría mediante la estimación de los productos generados en términos de peso y el carbono retenido en los mismos por unidad de peso, distinguiendo en este caso entre productos con distintos periodos de vida útil (Pérez-Cruzado et al. 2012a). Para la cuantificación del carbono en el segundo caso habría que tener en cuenta el carbono que se deja de emitir por la sustitución de productos con balances de carbono desfavorables por aquellos generados en base a madera. Esta cuantificación puede resultar compleja,

porque requiere el conocimiento de la huella de carbono de los productos sustituidos, algo que únicamente se puede obtener mediante estudios del ciclo de vida.

Por último, un aspecto común a la estimación de la captura de carbono en todos los compartimentos, es que la unidad de medida en todos los casos son toneladas de CO₂ equivalente (CO₂e). Esto significa que, si en el proceso de cálculo intervienen otros GEI distintos del CO₂, será necesario convertir estos a CO₂e, para lo que se suelen emplear los valores oficiales de las Guías del IPCC para Inventarios de Gases de Efecto Invernadero (IPCC, 2019). También se debe de considerar que algunas de las actuaciones implicadas en las estimación suponen trabajar en términos de carbono (C) y no CO₂, por lo que será necesario aplicar una tasa de cambio entre ambos, para lo que será necesario emplear los pesos moleculares del carbono (12.011 g/mol) y del CO₂ (44.01 g/mol).

3.4 Adicionalidad: líneas base

Los proyectos de captura de carbono se basan en la adicionalidad de las actuaciones contempladas en el proyecto en relación al escenario *"business as usual"*, que se correspondería con la evolución del sitio sin la implementación del proyecto. Es por lo tanto necesaria la definición de lo que se denomina línea base del proyecto, así como su nivel de acumulación de carbono característico, a los efectos de usar esta referencia para estimar la adicionalidad del proyecto. Esta comparación que pudiera resultar evidente en la mayor parte de los ámbitos de la ingeniería, es un aspecto complejo en algunas tipologías de proyectos forestales de captura de carbono, debido a que los árboles y el resto de estratos vegetales presentes en la zona de implantación del proyecto crecerán, y acumularán por lo tanto carbono, independientemente de la implantación del proyecto.

Se podrían distinguir dos casos en cuanto a la determinación de la adicionalidad sobre la línea base, que de forma genérica coinciden con las tipologías de proyectos descritas en el apartado 3.1: i) aquellos casos en los que los stocks de carbono para los compartimentos elegibles en la zona de implantación del proyecto son estables antes de la implantación del proyecto, y ii) aquellos casos en los que existe una dinámica de pérdida o acumulación de carbono en los compartimentos elegibles en la zona de implantación del proyecto. En el primer caso, será necesario caracterizar el valor de stocks de carbono en la zona de estudio con anterioridad a la implantación del proyecto, y será sobre este valor sobre el que se determinará la adicionalidad. El segundo caso tiene una mayor complejidad metodológica, ya que requiere de: 1) la caracterización de la evolución histórica temporal de los stocks de carbono para los compartimentos elegibles, 2) la modelización matemática de la evolución, y 3) la proyección en base a los modelos de la evolución futura de los stocks de carbono del escenario *"business as usual"*. Una alternativa metodológica para este último caso sería la implantación de un sistema de monitorización pareado (zona de proyecto, zona de referencia), que sirva para determinar la adicionalidad de las actuaciones del proyecto por la comparación directa de los valores en ambos sistemas de monitorización. Esta alternativa tiene como ventajas la menor dependencia de los modelos de proyección y de los datos que lo alimentan, y la mejor adaptación a eventos que suponen cambios en la dinámica de acumulación o pérdida de carbono en los compartimentos elegibles y que ocurren en periodos de recurrencia largos, pero su principal desventaja es el elevado coste de monitorización.

4 Conclusiones

En el presente trabajo se diserta sobre los mecanismos de compensación de emisiones de GEI mediante actuaciones forestales. Sin ánimo de ser exhaustivos, se presentan los tipos de proyectos, las metodologías empleadas para la evaluación del C capturado y los compartimentos elegibles, así como la forma de determinar las condiciones de referencia.

5 Referencias

- Alusiola, R. A., Schilling, J., & Klär, P. (2021). REDD+ conflict: Understanding the pathways between forest projects and social conflict. *Forests*, 12(6), 748.
- Colleparidi, I., Ziacco, E., Pérez-Cruzado, C., & Monaco, A. L. (2021). Characterisation of woody necromass in beech forests with different anthropic accessibility: the case of La Rioja (ES). *Environ. Sci. Proc.* 2021, 3(1), 26
- España. Real Decreto-ley 163/2014, de 14 de marzo, por el que se crea el registro de huella de carbono, compensación y proyectos de absorción de dióxido de carbono. *Boletín Oficial del Estado*, 29 de marzo de 2014, núm. 77, pp. 27437-27452.
- Greenfield, P. (2023). Revealed: more than 90% of rainforest carbon offsets by biggest certifier are worthless, analysis shows. *The Guardian* Wed 18 Jan 2023. Obtenido de <https://www.theguardian.com/environment/2023/jan/18/revealed-forest-carbon-offsets-biggest-provider-worthless-verra-aoe>
- Gregoire, T. G., & Valentine, H. T. (2007). *Sampling strategies for natural resources and the environment*. CRC Press.
- IPCC 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>
- IPCC, 2022: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.
- MITECO (2023) Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico. Inventario Forestal Nacional. Obtenido el 19 de abril de 2023, desde <https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/inventarios-nacionales/inventario-forestal-nacional/index.aspx>
- Pérez-Cruzado, C., & Rodríguez-Soalleiro, R. (2011). Improvement in accuracy of aboveground biomass estimation in *Eucalyptus nitens* plantations: effect of bole sampling intensity and explanatory variables. *Forest Ecology and Management*, 261(11), 2016-2028.
- Pérez-Cruzado, C., Mohren, G. M., Merino, A., & Rodríguez-Soalleiro, R. (2012a). Carbon balance for different management practices for fast growing tree species planted on former pastureland in southern Europe: A case study using the CO₂ Fix model. *European Journal of Forest Research*, 131, 1695-1716.
- Pérez-Cruzado, C., Mansilla-Salineró, P., Rodríguez-Soalleiro, R., & Merino, A. (2012b). Influence of tree species on carbon sequestration in afforested pastures in a humid temperate region. *Plant and Soil*, 353, 333-353.
- Pérez-Cruzado, C., Álvarez-González, J.G., Magdon, P., Sarodja, D., Fehrmann, L., Kleinn, C. (2017) Propagación de errores en el inventario de biomasa en bosques naturales: efecto de las distintas fuentes de incertidumbre. *Actas 7º Congreso Forestal Español*. Plasencia (España).
- Schwarze, R., Nilsson, J. O., & Olander, J. (2002). Understanding and managing leakage in forest-based greenhouse-gas-mitigation projects. *Philosophical Transactions of the*

Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 360(1797), 1685-1703.

UNFCCC 1997 Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change, Dec. 10, 1997, 2303 U.N.T.S. 162

UNFCCC 2007. Bali Agreement to the United Nations Framework Convention on Climate Change, Dec. 15, 2007, Report of the Conference of the Parties

UNFCCC 2015. Paris Agreement to the United Nations Framework Convention on Climate Change, Dec. 12, 2015, T.I.A.S. No. 16-1104

Comunicación alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

