



**2025** | **16-20**  
GIJÓN | JUNIO

9º CONGRESO **FORESTAL** ESPAÑOL

**9CFE-1652**

---

Organiza





## **Robustez en la cuantificación de biomasa del sistema BASOKO para la certificación de absorciones de carbono bajo el Reglamento Europeo en las masas forestales de Euskadi.**

BLANCO-CANO, L. (1), LULL-NOGUERA C. (1), LIDÓN-CEREZUELA, A. L. (1), ARNAL-ROIG, A. (1), MURILLO-GALLEGO, M. (1), OLMOS-BRAVO, A. (1), ONAINDIA-BEREZIARTUA, A. (2), URÍA-PEÑA, A. (3), MAIOZ, J. (4), CALAMA, R. (5), DEL CAMPO-GARCÍA, A. D. (1)

(1) Grupo Re-ForeST. Universitat Politècnica de València.

<https://gruporeforest.webs.upv.es/>

(2) Basoa Fundazioa.

(3) KONFE. Confederación de Forestalistas del País Vasco-Euskadiko Basogintza Elkarteen Konfederakundea

(4) Asociación de Propietarios Forestales de Gipuzkoa

(5) Instituto de Ciencias Forestales ICIFOR, INIA-CSIC

### **Resumen**

Las políticas de la Unión Europea buscan la neutralidad climática en 2050 y el sector LULUCF, como emisor y receptor de los gases de efecto invernadero (GEI), está impulsando el mercado voluntario de créditos carbono y sus sistemas de certificación. Para garantizar la fiabilidad de estos créditos, la Unión Europea (EU) ha establecido cuatro criterios QU.A.L.ITY (QU: cuantificación; A: adicionalidad; L: responsabilidad; ITY: sostenibilidad). Basado en esta iniciativa se ha desarrollado BASOKO sistema, que trata de implantar este mercado en Euskadi. Parte de la fiabilidad del sistema, reside en la QU, basada en el modelo de procesos BIOME-BGC MUSO, que estima la evolución del carbono en diferentes compartimentos del ecosistema a nivel diario. El modelo ha sido calibrado para 13 especies con diferentes taxonomías (T, conífera o frondosa) y turnos de corta (TC, desde 15 hasta 120 años). Para evaluar su robustez se inventariaron y simulaban 145 parcelas y los resultados se evaluaron en cuatro niveles: parcela, especie, T, T × TC. Los resultados preliminares muestran a nivel parcela un  $R^2$  de 0.92 en la comparación de diámetros (cm) estimados y observados. Mientras que en función de la especie el RMSE puede tomar valores desde 1.96 a 7.67, concluyendo que este método de cuantificación es suficientemente robusto para ser potencialmente reconocido por la EU.

### **Palabras clave**

carbono del ecosistema, criterios QU.A.L.ITY, coeficiente de determinación, mercado voluntario de carbono, Modelos basados en procesos

### **1. Introducción**

Los bosques contribuyen a la mitigación de cambio climático mediante la absorción y acumulación de CO<sub>2</sub> (NABUURS et al., 1997). Este rol de sumidero puede ser potenciado a través de la gestión forestal sostenible (RUIZ-PEINADO et al., 2013; DE LA CRUZ et al., 2016). Aunque dependiendo del tipo gestión se



obtendrá un efecto diferenciado el carbono almacenado en los reservorios y en los flujos. Por ello es importante conocer la cantidad de carbono existente en cada uno, para poder evaluar sus efectos. De manera genérica, el carbono de un ecosistema forestal se distribuye de la siguiente manera: 44 % en vegetación, el 45 % en el suelo orgánico, el 6% en la hojarasca y el 4% en la madera muerta (FAO, 2020). Además, en últimos años, se han aumentado e intensificado los esfuerzos en la mitigación del cambio climático. Los hitos más destacados son el establecimiento del Acuerdo de París en 2015 donde los estados miembros se comprometían a mantener el aumento de las temperaturas por debajo de los 2°C, el Pacto Verde al que se comprometió la Unión Europea por el cual se compromete a la neutralidad de emisiones para 2050 y la introducción del sector LULUCF (siglas en inglés de "uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura") como emisor y receptor de los gases de efecto invernadero (GEI). Estos hechos, donde existe una gran potencialidad de mitigación a través de los bosques y la gestión forestal, junto con las políticas mundiales y europeas, han generado el comienzo de un nuevo mercado de créditos voluntarios de carbono.

Asociado a este mercado, los marcos de certificación también se dispararon (VAN BAREN et al., 2023). Tanto es así, que la Unión Europea ha establecido el Reglamento (UE) 2024/3012 publicado el 27 de noviembre de 2024, por el que se establece un marco de certificación para las absorciones permanentes de carbono, la carbonocultura y el almacenamiento de carbono en productos. Este Reglamento establece los cuatro criterios Q.U.A.L.I.T.Y, sobre los que los marcos certificadores se deben basar para ser avalados por la UE. El criterio de cuantificación (Q) garantiza la medición de los créditos de una manera precisa; el criterio de adicionalidad (A) establece que las absorciones generadas sean adicionales, es decir, solo se certifican las absorciones generadas mediante prácticas selvícolas que van más allá de las habituales; el criterio de almacenamiento, seguimiento y responsabilidad (L) asegura el almacenamiento a largo plazo o de manera permanente; y por último, el criterio de sostenibilidad (ITY) asegura que la actividad adicional no cause un perjuicio significativo al medio ambiente y pueda generar beneficios secundarios.

Ante esta nueva oportunidad de mercado, los gestores forestales de Euskadi dinamizaron la creación de un grupo de trabajo para implantar este tipo de mercado voluntario. Este nuevo mercado debe responder a las peculiaridades de Euskadi, donde ya hay un mercado de la madera implantado y gran parte de sus bosques están siendo certificados en gestión forestal sostenible por PEFC. Además, cabe destacar que otros mercados solo tienen en cuenta repoblaciones, pero en el caso de Euskadi, donde el tipo de paisaje es en mosaico y la mayor parte del suelo (55%) es forestal, este tipo de gestión para generar créditos de carbono no es viable. Ante esta situación, solo el cambio en la gestión forestal o en el itinerario selvícola, permitirá generar absorciones de carbono extras que se puedan vender como créditos de carbono.

Por ello, desde esta necesidad de los gestores forestales y las particularidades de Euskadi, surge BASOKO sistema (<https://basokosistema.org/>), el cual propone un marco metodológico para la certificación de adicionalidad de carbono por gestión



forestal sostenible. Su objetivo final es generar un puente entre las entidades que emiten CO<sub>2</sub> y las entidades que realizan actividades de absorción del CO<sub>2</sub>. Este sistema se compone de cuatro partes principales: (i) KARBO-KALKU: diseño del plan de gestión o itinerario selvícola que promueve las absorciones de carbono adicionales y se les asocian los costes-beneficios, (ii) KARBO-ZIURTAGIRIA: proceso de certificación del plan y auditoría de los créditos de carbono, (iii) KARBO-ERROLDA: registro público de dichos créditos de carbono y (iv) KARBO-MERKATUA: espacio de compra-venta de los créditos de carbono.

## 2. Objetivos

Para asegurar la viabilidad del mercado voluntario establecido por BASOKO sistema, los cálculos y estimaciones de las absorciones de carbono y por tanto de los créditos de carbono realizados en KARBO-KALKU, deben ser robustas y ajustarse a la realidad. Por ello, el objetivo principal de este trabajo es evaluar las estimaciones realizadas por esta herramienta sobre toda la superficie de Euskadi y para las 13 especies de interés. Para ello:

- (i) se seleccionará un proxy que una las simulaciones basadas en el carbono con los inventarios dasométricos clásicos
- (ii) se recopilarán y/o muestrearán parcelas en campo para su comparación con los valores estimados
- (iii) se analizarán los valores estimados y observados a varios niveles para evitar posibles sesgos

## 3. Metodología

### a. Área y especies de estudio

El área de estudio abarca la superficie total de la comunidad autónoma de Euskadi, situada en el norte de España. Euskadi destaca por su alta superficie forestal arbolada, que ocupa un 54.8 %, aumentando hasta un 68 % cuando se contabilizan las superficies desarboladas (pastizal, matorral, roquedos) (HAZI, 2023). Dentro de esta superficie forestal hay un mayor porcentaje de frondosas que de coníferas y la superficie de las plantaciones supera a los bosques naturales (HAZI, 2023). Sin embargo, la distribución y ocupación de las masas varía entre las tres provincias: (Bizkaia, Gipuzkoa y Araba), debido a sus particularidades climáticas y demográficas. A nivel climatológico Bizkaia, Gipuzkoa y el norte de Araba tienen un clima atlántico, mientras que el sur de Araba tiene un clima continental. También destaca que el 25% de los montes en Bizkaia, Gipuzkoa son públicos, mientras que en Araba lo son el 75% aproximadamente. Esta casuística climática-demográfica influye altamente en el tipo de formaciones presentes, donde en la zona atlántica hay mayor cantidad de repoblaciones productoras y formaciones de frondosas, mientras que en la zona más continental la especie principal es el *Pinus sylvestris*.

Por otro lado, a nivel Euskadi, la especie con mayor ocupación forestal (25%) es el *Pinus radiata*, seguido por el *Fagus sylvatica* (14%). A continuación, hay otras 16 especies o formaciones principales, de las cuales su ocupación puede variar de un



1 a un 10 % (Figura 1). Esta información, junto al conocimiento experto de los técnicos forestales de Euskadi y la necesidad de representar diferentes grupos de especies en términos de taxonomía y turnos de corta se decidió hacer un estudio detallado de 13 especies (calibradas) y un estudio asociado a otras 4 (asociadas) (Tabla 1). La diferencia entre las especies calibradas y asociadas se detalla en el apartado 3.3.

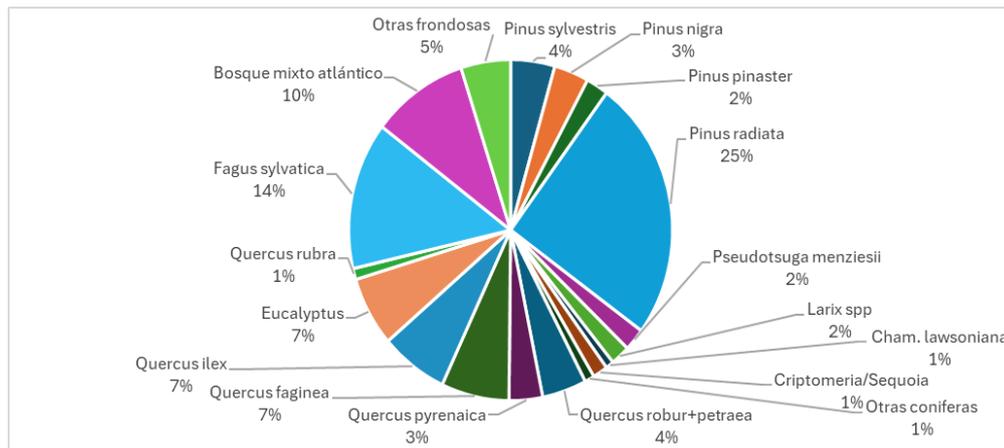


Figura 1. Superficie ocupada por las especies forestales principales en Euskadi (Elaboración propia a partir de datos de HAZI, 2023).

Tabla 1. Descripción de las especies incluidas en el estudio. El símbolo \* indica las 13 especies que ha sido calibrada individualmente, y los 4 restantes las especies asociadas.

Taxonomía	[T]	Taxonomía x Turno	[T x TC]	Especie
Conífera	[C]	rápido (35-45)	[C35]	Pinus radiata * Pinus pinaster *
medio (60-80)	[C60]	Chamaecyparis lawsoniana	Pinus nigra *	Pseudotsuga menziesii * Cryptomeria japónica* Sequoia sempervirens *
lento (120)	[C120]			Pinus sylvestris *
Frondosa	[F]	rápido (15-35)	[F15]	Eucalyptus nitens * Eucalyptus globulus Robinia pseudoacacia
medio (60)	[F60]	Quercus rubra *	Fraxinus excelsior *	Castanea sativa Betula alba *
lento (120)	[F120]	Quercus robur/petraea *		Fagus sylvatica *

3.

a. Recopilación de datos y mediciones en campo

Se caracterizaron 145 parcelas situadas en rodales, principalmente repoblaciones monoespecíficas, de las especies de estudio (Figura 2). Esta caracterización consistió en obtener de manera específica para cada parcela, información sobre la

plantación (año y marco de plantación), tratamientos selvícolas llevados a cabo hasta el año del inventario (año e intensidad de eliminación de pies y/o ramas en las cortas y/o podas realizadas) e inventario dasométrico (año del inventario, densidad y diámetro a la altura del pecho (DAP, 130 cm)). Estos datos se utilizaron como datos de entrada en la simulación a excepción del DAP. Este DAP obtenido en los inventarios (DAPobs) se utilizó como evaluador de la robustez de KARBO-KALKU. En el caso de no disponer de la información de sobre el marco de plantación o sobre los tratamientos, se aplicaron los datos de los itinerarios selvícolas de cada provincia junto con el conocimiento experto de los gestores forestales de las parcelas de estudio.

Estos inventarios fueron realizados por las Asociaciones Forestales de las tres provincias de Euskadi, por el INIA y por la UPV, durante diferentes campañas desde 2004 hasta 2024, las cuales cubrían diferentes objetivos. Estos inventarios se seleccionaron con la intención de abarcar la distribución de las especies en Euskadi, condiciones de sitio y rangos de edades. La falta de inventarios en el sur de Araba se debió a la escasez de repoblaciones monoespecíficas de las especies de estudio.

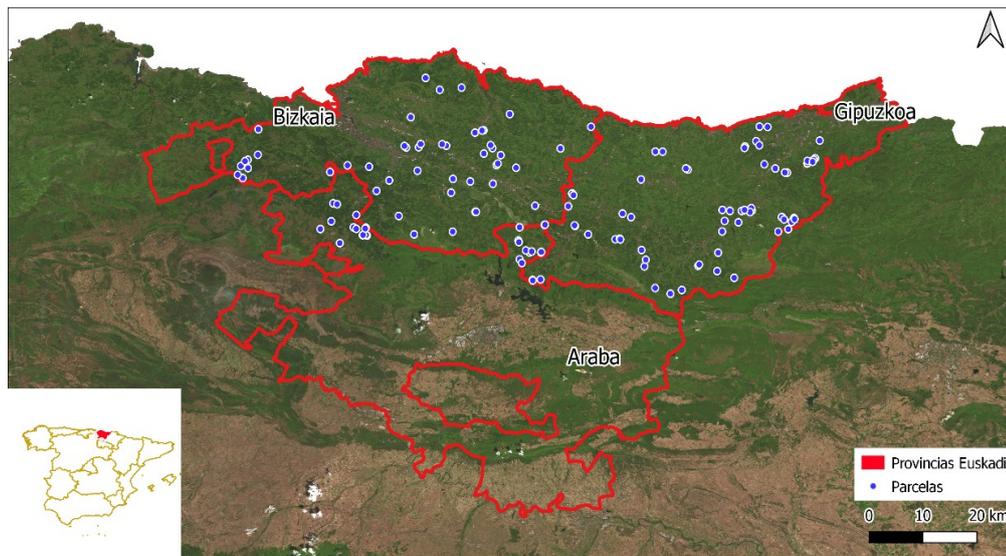


Figura 2. Localización de las 145 parcelas utilizadas en este estudio.

3.
  - a. Simulación del carbono y estimación del DAP mediante KARBO-KALKU

KARBO-KALKU es una herramienta de apoyo a la decisión implementada en BASOKO sistema (<https://basokosistema.org/>). Concretamente, permite comparar diferentes itinerarios selvícolas (edad e intensidad de corta y/o podas aplicadas) en términos tanto físicos como económicos e incluso establecer una línea base (itinerario selvícola estándar) y compararla con itinerarios alternativos para extraer valores de adicionalidad. En el cálculo de la parte física se predice



anualmente la acumulación, fijación y extracción de carbono en los diferentes compartimentos del ecosistema: parte aérea y radical de la vegetación, hojarasca, madera muerta, suelo orgánico y madera extraída para productos derivados de la madera.

Esta predicción se realiza a través del modelo basado en procesos BIOME-BGCMuSo V 6.2 (HIDY et al., 2021), que simula el almacenamiento y flujo de agua, carbono y nitrógeno en el sistema suelo-planta-atmósfera tanto a nivel diario como anual. Este modelo utiliza 5 conjuntos de datos principales: i) archivo de inicio, descripción de las características físicas y climáticas generales y marco temporal de simulación; ii) meteorología diaria de los años de simulación, incluyendo datos de temperatura, precipitación, radiación, déficit de presión de vapor y duración del día; iii) constantes ecofisiológicas de la especie de estudio; iv) propiedades del suelo; v) archivo de gestión donde se describe fechas e intensidad de las cortas y/o podas.

Para hacer operativa esta herramienta, KARBO-KALKU incorpora una base de datos interna que descarga esta información de entrada de manera automática y un método de estimación del DAP (Figura 3). En referencia a los datos de entrada, KARBO-KALKU dispone de mapas *raster* de sitio (elevación), suelo (profundidad de suelo, carbono orgánico, densidad aparente, pH, arena, limo, pedregosidad), clima diario histórico (interpolación basada en estaciones históricas de la AEMET de 2020 hasta 1976) y clima diario futuro (escenario de cambio climático RCP4.5 (IHOBE, 2023)). La información de estos *raster* se extrae utilizando el archivo *shape* de la parcela o del plan de gestión introducido en el BASOKO sistema por el usuario. Por otro lado, KARBO-KALKU incluye 13 especies forestales calibradas: *P. radiata*, *P. pinaster*, *P. nigra*, *P. menziesii*, *C. japonica*, *S. sempervirens*, *P. sylvestris*, *E. nitens*, *Q. rubra*, *F. excelsior*, *B. pendula*, *Q. robur/petraea*, *F. sylvatica* (Tabla 1). Además, de esta información automática, el usuario debe introducir información de manera manual: año de plantación, densidad inicial de plantación e itinerario que ya estaba realizado. El itinerario se compone de tipo de actuación (corta o poda), año de la actuación, intensidad de la actuación en porcentaje (en cortas se define el porcentaje de pies eliminados y en las podas el porcentaje de ramas y hojas eliminados) y el porcentaje de extracción (solo aplica a las cortas). Tras la introducción de datos en KARBO-KALKU, se realiza la simulación a través del modelo BIOME-BGCMuSo que predice el carbono en los diferentes reservorios del ecosistema. Las unidades utilizadas por este modelo son kgC/m<sup>2</sup>. A continuación, el valor del carbono es transformado por KARBO-KALKU a un valor de DAP. Esta conversión se realiza en tres pasos:

(i) estimación de la biomasa en superficie (kgB/m<sup>2</sup>) a través del carbono (kgC/m<sup>2</sup>) obtenido asumiendo que la relación biomasa:carbono es de 2:1, es decir, se aplica un factor de conversión que multiplica el carbono por dos para obtener la biomasa.

(ii) cálculo de la biomasa por pie individual (kgB/pie), se divide la biomasa en superficie (kgB/m<sup>2</sup>) entre la densidad de árboles en superficie, esta densidad está contemplada en KARBO-KALKU con el dato de densidad inicial de plantación y el porcentaje pies eliminados con las cortas.

(iii) estimación del DAP, la biomasa de pie individual se sustituye en las ecuaciones



alométricas específicas de cada especie (Tabla 2), despejándose el DAP. En el caso que kgB no sea las unidades de las ecuaciones, se aplican los factores de conversión necesarios. Con este método KARBO-KALKU estima el DAP (DAPest) y es este valor el que se somete a evaluación en este trabajo.

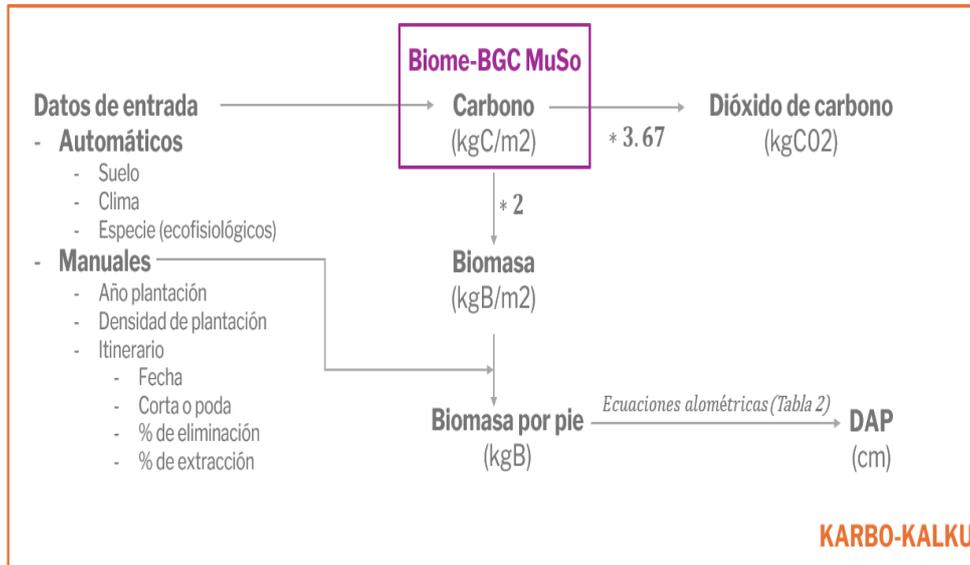


Figura 3. Flujo de trabajo que sigue la parte de cálculo físico de KARBO-KALKU..

Finalmente, en este trabajo se simularon los 145 casos de estudio (Figura 2) de manera individual, obteniendo el DAP estimado (DAPest) medio en el año en el que se realizó la medición del DAP real (DAPobs). Las simulaciones se realizaron desde el año de plantación hasta el año del inventario y se introdujo la información que se ha mencionado anteriormente: densidad de plantación y tratamientos aplicados. En este trabajo además de realizar las simulaciones de parcelas correspondientes a las 13 especies calibradas, se incluyeron cuatro especies sin calibrar para estudiar la fiabilidad de los resultados de especies no calibradas. A estas cuatro especies se les ha denominado “asociadas”, debido a que se les ha asociado la calibración y ecuación alométrica de una de las 13 especies ya calibradas. Concretamente se ha asociado la *C. lawsoniana* con *C. japónica*, *E. globulus* con *E. nitens*, *R. pseudoacacia* y *C. sativa* con *Q. rubra*.

Tabla 2. Ecuaciones alométricas para estimar la biomasa y/o el carbono de la parte aérea de la vegetación (AGB, AB, BT, AGBC y TAB) a partir del DAP (D (cm)). En KARBO-KALKU se han implementado estas ecuaciones, pero despejando el DAP para, obtener obtener el DAP en función de la biomasa (DAP ~ Biomasa).

Especie	Ecuaciones alométricas *	Referencias
<i>P. radiata</i>	$\ln \quad AGB$	$(kg) = -2.416 + 2.37 * \ln \quad D (cm)$ Moore et al., 2010
<i>P. pinaster</i>	$\ln \quad AB$	$(kg) = -1.457 + 1.8647 * \ln \quad D (cm)$ Zianis et al., 2005
<i>P. nigra</i>	$\ln BT = -2.7773 + 2.51564 * \ln$	$D (cm)$ Montero et al., 2005

<i>P. menziesii</i>	$\ln$	$AB$	$(kg) = -1.957 + 2.2996 * \ln$	$D (cm)$	Zianis et al., 2005
<i>C. japonica</i>	$AB (g) = 174.423 *$	$D (cm)$	2.181		Lim et al., 2013
<i>S. sempervirens</i>	$AB (Mg) = 0.0000606 *$	$D (cm)$	2.55		Sillett et al., 2020
<i>P. sylvestris</i>	$\ln BT(kg) = -2.50275 + 2.41194 * \ln$	$D(cm)$			Montero et al., 2005
<i>E. nitens</i>	$AB (kg) = 0.2068 *$	$D (cm)$	2.3191		Werner et al., 2001**
<i>Q. rubra</i>	$AGBC (kgC) = 0.032 *$	$D (cm)$	2.599		Bazrgar et al., 2024
<i>F. excelsior</i>	$TAB (kg) = 0.364819 *$	$D (cm)$	2.241458		Krejza et al., 2017
<i>B. pendula</i>	$\ln BT(kg) = -1.60855 + 2.26855 * \ln$	$D(cm)$			Montero et al., 2005
<i>Q. robur/petraea</i>	$\ln BT(kg) = -2.30619 + 2.50077 * \ln$	$D(cm)$			Montero et al., 2005
<i>F. sylvatica</i>	$AB (kg) = 0.22062 *$	$D (cm)$	2.33865		Vejpustková et., 2015

\* AGB = total above-ground tree mass; AB = Total aboveground biomass or aboveground biomass; BT = Total biomasa aérea; AGBC = aboveground biomass carbon; TAB = total above ground biomass

\*\* Es una ecuación para *E. tetradonta* pero era la ecuación que más se acercaba a los resultados de las ecuaciones de RUIZ-PEINADO et al., 2012.

### 3.

#### a. Análisis estadístico

El análisis estadístico se centra en la comparación del DAP obtenido de los inventarios de campo (DAPobs) con el DAP estimado a partir de KARBO-KALKU (DAPest). Esta comparación se realizó mediante una regresión lineal con el intercepto igualado a cero donde la comparación sea:  $DAP_{est} \sim DAP_{obs}$ , extrayendo el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE). El  $R^2$  indica la proporción de la varianza de DAPest que puede explicarse a partir de DAPobs y el RMSE proporciona una medida del error del modelo en las mismas unidades (cm en este caso), indicando el promedio de las desviaciones entre los valores estimados y observados.

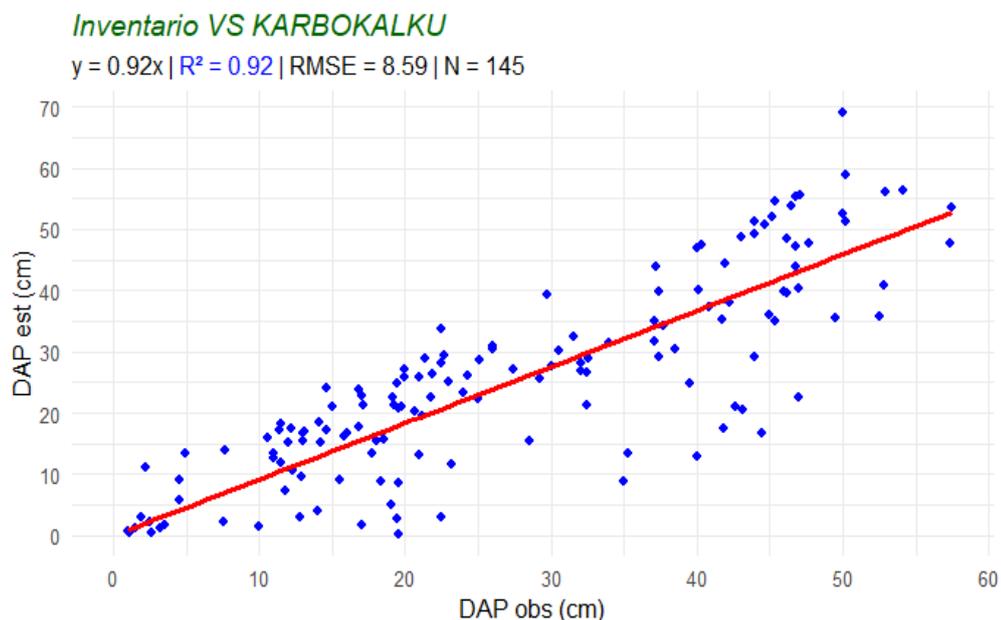
Al tener una alta variedad de especies con diferentes taxonomías, turnos de cortas (y por tanto de periodos de crecimiento) y propiedades intrínsecas (por ejemplo, densidad de la madera, relación biomasa  $\sim$  DAP, etc.). Por ello se ha realizado el mismo análisis en cuatro niveles (Tabla 1): (i) parcela (ii) taxonomía (T) (iii) taxonomía x turno (T x TC) y (iv) especie. Además, en el caso de los niveles parcela, T y T x TC, se han realizado análisis tanto, separando las especies calibradas de las asociadas, como uniéndolas.

## 4. Resultados

A nivel de parcela (n = 145) se obtuvo un ajuste de los datos de DAPobs y DAPest



con  $R^2 = 0.92$  y con un RMSE de 8.59 (Figura 4), lo que sugiere que el 70 % (asumiendo una distribución normal) de los diámetros estimados (DAPest) tendrán este margen de error de  $\pm 8.59$  respecto a los diámetros reales (DAPobs). Estos parámetros ( $R^2$  y RMSE) pueden variar en función de la T, T x TC o especie o especies calibradas o asociadas (Figura 4). Por otro lado, el modelo presentó una tendencia equilibrada entre sobreestimación e infraestimación, mostrando una sobreestimación en 73 de los 145 casos sobreestimados y una infraestimación en los 72 restantes, respecto al DAPobs. Aunque destaca la diferencia en los RMSE, siendo 5.6 en el caso de las sobreestimaciones y 11.3 en el caso de las infraestimaciones, lo que sugiere que el modelo tiende a infraestimar con mayor magnitud.



*Figura 4. Comparación del DAP observado y estimado a nivel de parcela. Junto con los estadísticos parámetros de evaluación ( $R^2$  y RMSE) y el número de parcelas empleados en el análisis ( $n = 145$ )*

A nivel taxonómico (T) las categorías presentaron  $R^2$  superiores al 90 %, menos en la categoría de coníferas asociadas, que presentaron un 54 % (Tabla 3). Por otro lado, los RMSE varían entre el 6.19 y el 8.84, siendo inferior en las frondosas las cuales obtiene un 6.84 y las coníferas un 8.84. Aunque en este nivel se observó una relación entre el RMSE y el número de casos estudiados (N), donde los valores más cercanos a cero del RMSE se relacionan positivamente con el menor número de casos (N).

A nivel taxonomía x turno (T x TC) hay categorías que no tenían especies asociadas, por lo que el análisis se centró en la comparación de las calibradas. En este caso los  $R^2$  fueron superiores al 0.80 y los RMSE variaron entre el 4.99 y 9.03

(Tabla 3). La categoría con mayor RMSE fueron las frondosas de 120 años de turno (F120) con un 9.03, seguido por las coníferas de 60 años de turnos (C60) con un 7.80. Mientras que la con menor RMSE fueron las frondosas de 15-35 años de turno (F15) con un 4.59 y las coníferas de 120 años de turno (C120) con un 4.99.

*Tabla 3. Comparación del DAP observado y estimado a nivel de taxonómico (T) y taxonomía x turno (T x TC). Junto con los parámetros de evaluación (R<sup>2</sup> y RMSE) y el número de parcelas empleados en el análisis.*

Nivel y categoría	Calibrada		Asociada		Calibrada + Asociada					
	N	R <sup>2</sup>	RMSE	N	R <sup>2</sup>	RMSE	N	R <sup>2</sup>	RMSE	
T	C	90	0.90	8.82	3	0.54	6.19	93	0.90	8.84
F	41	0.96	6.79	11	0.92	6.95	52	0.96	6.85	
T x TC	C35	28	0.96	6.90	-	-	-	28	0.96	6.90
C60	55	0.92	7.80	3	0.54	6.19	58	0.91	7.88	
C120	7	0.84	4.99	-	-	-	7	0.84	4.99	
F15	11	0.93	4.59	6	0.93	3.99	17	0.94	4.40	
F60	18	0.98	5.87	5	0.91	9.33	23	0.97	6.88	
F120	12	0.93	9.03	-	-	-	12	0.93	9.03	

Por último, a nivel de especie los R<sup>2</sup> fueron superiores a 0.72, excepto en el caso de la especie asociada *C. lawsoniana* que es 0.54. Y en términos de RMSE, se observó una alta variación entre especies, tomando valores desde 1.96 a 9.33 en el total de especies, sin embargo, en el caso de las especies calibradas se redujo a valores desde 1.96 a 7.67 (Tabla 4). Las especies calibradas con menor RMSE fueron *B. pendula* (1.96), *C. japonica* (3.37) y *S. sempervirens* (3.94), mientras que las especies con mayor RMSE fueron *F. sylvatica* (7.67), *P. pinaster* (7.55) y *F. excelsior* (6.86).

*Tabla 4. Comparación del DAP observado y estimado a nivel especie. Junto con los parámetros de evaluación (R<sup>2</sup> y RMSE) y el número de parcelas empleados en el análisis.*

Calibradas				Asociadas			
Especie	N	R <sup>2</sup>	RMSE	Especie	N	R <sup>2</sup>	RMSE
<i>P. radiata</i>	16	0.95	6.35	<i>C. lawsoniana</i>	3	0.54	6.19
<i>P. pinaster</i>	12	0.95	7.55	<i>E. globulus</i>	3	0.93	3.67

P. nigra	14	0.86	6.80	R. pseudoacacia	3	0.91	4.19
P. menziesii	14	0.97	5.43	C. sativa	5	0.91	9.33
C. japonica	12	0.97			3.37		
S. sempervirens	15	0.98			3.94		
P. sylvestris	7	0.84			4.99		
E. nitens	11	0.93			4.59		
Q. rubra	12	0.99			5.20		
F. excelsior	2	0.72			6.86		
B. pendula	4	0.97			1.96		
Q. robur/petraea	3	0.97			5.74		
F. sylvatica	9	0.95			7.67		

## 5. Discusión

El modelo BIOME-BGCMuSo es el motor del cálculo altamente preciso, el cual en trabajos anteriores, ha sido testado y utilizado para simular la acumulación y/o fijación del carbono en la vegetación (TORIYAMA et al., 2021), en el suelo orgánico (OSTROGOVIĆ et al., 2021) y en la hojarasca (MERGANIČOVÁ et al., 2024). La precisión de sus resultados depende principalmente de la calidad de los datos de entrada como información detallada sobre sitio, suelo y clima y la parametrización correcta de los parámetros ecofisiológicos de la especie a simular. Esto implica que la precisión de los resultados obtenidos a través de KARBO-KALKU se relacionan directamente con la calidad de los datos de entrada. Por ello, para obtener resultados con problemas reducidos de precisión y con los mismos sesgos y comparables entre sí, KARBO-KALKU ofrece al usuario estos datos de entrada de manera automática.

Además de estos posibles sesgos derivados de los datos de entrada, KARBO-KALKU, realiza una serie de asunciones para estimar el DAP estimado medio. En primer lugar, hace una transformación del carbono a biomasa asumiendo que la relación biomasa:carbono es de 2:1 (50 %). Aunque esta relación ha sido usada en otros trabajos (PENMAN et al., 2003; CIENCIALA et al., 2006), se sabe que en función de la especie esta relación puede variar (MARTIN et al., 2018). En un estudio realizado por MONTERO et al. (2005) el porcentaje de carbono en la materia seca puede variar desde el 49.2 % a 51.1 %. En segundo lugar, la transformación de biomasa a DAP se realiza mediante ecuaciones alométricas procedentes, lo puede añadir incertidumbre al valor del DAPest, ya que se tiene el propio error de las ecuaciones más el propio error derivado de la simulación con BIOME-BGCMuSo. Todas estas fuentes de incertidumbre y limitaciones son susceptibles de mejora en siguientes versiones de KARBO-KALKU.



Reconocidas estas limitaciones propias de la simulación, se realizó la evaluación de los DAP simulados y observados en las 145 parcelas donde se obtuvo un RMSE del 8.59, lo que sugiere que el 70 % de los diámetros estimados, tienen un rango de error de 8.59 cm. Además KARBO-KALKU sobreestima e infraestima de manera balanceada, aunque en el caso de la infraestimación comente mayores errores. De cara al mercado de carbono esto significa que los créditos de carbono estimados y por tanto ofertados tendrán un error de estimación (sobreestimando o infraestimando), pero que los mayores errores se darán en la infraestimación, por lo que en estos casos los créditos estimados serán inferiores a los créditos reales finales.

En referencia a la evaluación se detectaron tres limitaciones: (i) Uso del DAP como parámetro a evaluar: Se decidió utilizar el DAP debido es el parámetro con el que los gestores forestales (usuarios principales de KARBO-KALKU) están más familiarizados frente a otros como el carbono. Esto dificulta la comparación con otros métodos de cálculo, por lo que en próximos análisis se incluirán los errores asociados al carbono y/o biomasa estimados frente a los reales, (ii) Bajo número de casos simulados: el número de parcelas evaluadas fue insuficiente para alguna especie, por lo que en próximos análisis se deberá densificar la colección de parcelas a favor de las que tienen una baja representatividad. También se deberá incluir en el análisis otras especies asociadas como *Q. faginea*, *Q. ilex*, *Q. pirenaica*, *Larix spp.* o *C. lawsoniana*, las cuales tienen una alta ocupación en la superficie forestal de Euskadi. (iii) Representación de las masas pluriespecíficas: las 145 simulaciones se basaron en repoblaciones monoespecíficas, por lo que solo se evaluó la robustez de KARBO-KALKU en este tipo de masas, en próximos análisis se deberán incluir masas bosques pluriespecíficos, bosques naturales y bosques mixto atlántico.

## 6. Conclusiones

Este estudio se centró en evaluar la capacidad predictora de la herramienta KARBO-KALKU del diámetro a la altura del pecho (DAP), el cual es un proxy de las absorciones de carbono. Los resultados generales mostraron ajustes elevados y un RMSE en la estimación del DAP de 8.59 cm, aunque este error varía considerablemente en función de la especie, desde RMSE de 1.96 hasta 7.67 cm. Tras estos resultados se puede concluir que KARBO-KALKU es una herramienta prometedora para el cálculo del DAP y por tanto de las absorciones de carbono asociadas en repoblaciones monoespecíficas de Euskadi, donde la especie sea una de las 13 calibradas: *P. radiata*, *P. pinaster*, *P. nigra*, *P. menziesii*, *C. japonica*, *S. sempervirens*, *P. sylvestris*, *E. nitens*, *Q. rubra*, *F. excelsior*, *B. pendula*, *Q. robur/petraea*, *F. sylvatica*. Aunque para aumentar su robustez se debe seguir densificando el número de parcelas y hacer un estudio más profundo de las especies asociadas e incluir evaluaciones de bosques mixtos, masas naturales y repoblaciones con dos o más especies.

## 7. Agradecimientos



Proyecto cofinanciado por el Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural (FEADER), a través del Programa de Desarrollo Rural de Euskadi del Gobierno Vasco. Este trabajo se ha desarrollado gracias a los técnicos forestales de las Asociaciones de Forestalistas de Bizkaia (Eduardo Rodríguez y Fernando Azurmendi), Gipuzkoa (Eneko Iturbe) y Araba (Ibón Munitxa) y HAZI (Alejandro Cantero), por su colaboración en la recolección de inventarios utilizados en este trabajo.

## 8. Bibliografía

BAZRGAR, A.; B., THEVATHASAN, N.; GORDON, A.; SIMPSON, J.; 2024. Allometric equations for estimating aboveground biomass carbon in five tree species grown in an intercropping agroforestry system in southern Ontario, Canada. *Agroforestry Systems*, 98(3), 739-749.

CIENCIALA, E. M. I. L.; HENZLIK, V. L. A. D. I. M. Í. R., & ZATLOUKAL, V. L. A. D. I. M. Í. R.; 2006. Assessment of carbon stock change in forests-adopting IPCC LULUCF Good Practice Guidance in the Czech Republic. *Forestry J*, 52, 17-28.

DE LA CRUZ, S.; CALAMA, R.; MONTERO, G., RUBIO, A.; 2016. Posibilidad de aumentar la capacidad de absorción de CO<sub>2</sub> de los sistemas forestales mediante la gestión forestal. *Comunicación presentada en CONAMA*, Madrid, 28.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS; 2020. Global forest resources assessment 2020—Key findings. Rome.

HAZI; 2023. El bosque vasco en cifras 2023. *Informe de HAZI Fundazioa sobre el Inventario forestal del País Vasco-2023*.

[https://www.euskadi.eus/contenidos/informacion/mapa\\_forestal\\_2023/es\\_agripes/adjuntos/El-bosque-vasco-en-cifras-2023.pdf](https://www.euskadi.eus/contenidos/informacion/mapa_forestal_2023/es_agripes/adjuntos/El-bosque-vasco-en-cifras-2023.pdf)

HIDY, D.; BARCZA, Z.; HOLLÓS, R.; THORNTON, P. E.; RUNNING, S. W.; FODOR, N.; 2021. User's Guide for Biome-BGCMuSo 6.2. Budapest: ELTE.

IHOBE; 2023. Escenarios de cambio climático de alta resolución para el País Vasco bajo las rutas de concentración de gases de efecto invernadero: RCP 4.5 y 8.5. *Gobierno Vasco*.

KREJZA, J.; SVĚTLÍK, J.; BEDNÁŘ, P.; 2017. Allometric relationship and biomass expansion factors (BEFs) for above-and below-ground biomass prediction and stem volume estimation for ash (*Fraxinus excelsior* L.) and oak (*Quercus robur* L.). *Trees*, 31, 1303-1316.

LIM, H.; LEE, K. H.; LEE, K. H.; PARK, I. H.; 2013. Biomass expansion factors and allometric equations in an age sequence for Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) in southern Korea. *Journal of forest research*, 18, 316-322.

MARTIN, A.R.; DORAISAMI, M.; THOMAS, S.C.; 2018. Global patterns in wood carbon



concentration across the world's trees and forests. *Nat. Geosci.* 11, 915–920. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0246-x>

MERGANIČOVÁ, K.; MERGANIČ, J.; DOBOR, L.; HOLLÓS, R.; BARCZA, Z.; HIDY, D.; ...; HLÁSNY, T.; 2024. Biogeochemical model Biome-BGCMuSo v6. 2 provides plausible and accurate simulations of carbon cycle in Central European beech forests. *Geoscientific Model Development Discussions*, 2024, 1-43.

MONTERO, G.; RUIZ-PEINADO, R.; MUNOZ, M.; 2005. Producción de biomasa y fijación de CO<sub>2</sub> por los bosques españoles. *Monografías INIA, Serie Forestal*, Madrid.

MOORE, J. R.; 2010. Allometric equations to predict the total above-ground biomass of radiata pine trees. *Annals of Forest Science*, 67(8), 806.

MUUKKONEN, P.; 2007. Generalized allometric volume and biomass equations for some tree species in Europe. *European Journal of Forest Research*, 126(2), 157-166.

NABUURS, G. J.; PÄIVINEN, R.; SIKKEMA, R.; MOHREN, G. M. J.; 1997. The role of European forests in the global carbon cycle—a review. *Biomass and bioenergy*, 13(6), 345-358.

OSTROGOVIĆ SEVER, M. Z.; BARCZA, Z.; HIDY, D.; KERN, A.; DIMOSKI, D.; MIKO, S., ... ; MARJANOVIĆ, H.; 2021. Evaluation of the terrestrial ecosystem model biome-BGCMuSo for modelling soil organic carbon under different land uses. *Land*, 10(9), 968.

PENMAN, J.; GYTARSKY, M.; HIRAISHI, T.; KRUG, T.; KRUGER, D.; PIPATTI, R.; ... & WAGNER, F.; 2003. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. *Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC*. Japan. ISBN 4-88788-003-0.

RUIZ-PEINADO, R.; MONTERO, G.; RÍO, M. D.; 2012. Biomass models to estimate carbon stocks for hardwood tree species. *Instituto de Ciencias Forestales (ICIFOR)*.

RUIZ-PEINADO, R.; BRAVO-OVIEDO, A.; LÓPEZ-SENESPLEDA, E.; MONTERO, G., RÍO, M. D.; 2013. Do thinnings influence biomass and soil carbon stocks in Mediterranean maritime pinewoods?. *European Journal of Forest Research*, 132(2), 253-262.

SILLETT, S. C.; VAN PELT, R.; CARROLL, A. L.; CAMPBELL-SPICKLER, J.; ANTOINE, M. E.; 2020. Aboveground biomass dynamics and growth efficiency of *Sequoia sempervirens* forests. *Forest Ecology and Management*, 458, 117740.



TORIYAMA, J.; HASHIMOTO, S.; OSONE, Y.; YAMASHITA, N.; TSURITA, T.; SHIMIZU, T.; ...; ISHIZUKA, S.; 2021. Estimating spatial variation in the effects of climate change on the net primary production of Japanese cedar plantations based on modeled carbon dynamics. *PLoS One*, 16(2), e0247165.

VAN BAREN, S.; ARETS, E.; DANKERS, C.; LESSCHEN, J. P.; SYBENGA, J.; DEMMENDAL-WIT, F.; KARSCH, P.; 2023. Review of certification methodologies for carbon farming-survey results and first assessment of coverage of the QU. A.L.I.TY criteria. *Carbon removals expert group technical assistance*. The Netherlands.

VEJPUSTKOVÁ, M.; ZAHRADNÍK, D.; ČIHÁK, T.; ŠRÁMEK, V.; 2015. Models for predicting aboveground biomass of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in the Czech Republic. *Journal of forest science*, 61, 2015 (2): 45–54. doi: 10.17221/100/2014-JFS

WERNER, P. A.; MURPHY, P. G.; 2001. Size-specific biomass allocation and water content of above-and below-ground components of three *Eucalyptus* species in a northern Australian savanna. *Australian Journal of Botany*, 49(2), 155-167.

ZIANIS, D.; MUUKKONEN, P.; MÄKIPÄÄ, R.; MENCUCCINI, M.; 2005. Biomass and stem volume equations for tree species in Europe. FI. <https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/512732/951-40-1984-9.pdf?sequence=1&isAllowed=y>