CONAMA 2026

# Desarrollo de una metodología para determinar el $CO_2$ biogénico en emisiones industriales

Investigación aplicada · CONAMA 2026

CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE
2026

**Edita:** Fundación Conama

**Año:** 2026

Este documento está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional.

## Personas autoras de la presente comunicación técnica

Autor Principal de la comunicación: Ainhoa Mendivil. Directora de Control Ambiental. SGS Tecnos.

Otros Autores: Joaquim Vergara. Director Técnico de Emisiones. SGS Tecnos.

Cristina Ramos. VP of Sales. SGS Beta.

# Índice

**Resumen** ..... **1**

**1. Introducción y justificación** ..... **2**

**2. Objetivos** ..... **2**

**3. Materiales y métodos** ..... **3**

3.1. Enfoque y delimitación de información ..... 3

3.2. Configuraciones de captación y estrategia de evaluación ..... 4

3.3. Definición del mensurando y modelos de medida ..... 5

3.3.1. Modelo de fracción biogénica ponderada por emisiones ..... 5

3.3.2. Modelo de composición de una muestra integrada ..... 7

3.3.3. Modelo de determinación isotópica ..... 8

3.3.4. Planteamiento de la evaluación de incertidumbre ..... 8

3.4. Validación prospectiva ..... 9

**4. Resultados del desarrollo metodológico** ..... **10**

4.1. Caracterización descriptiva de los antecedentes experimentales ..... 10

4.2. Arquitectura de la cadena de medida ..... 12

4.3. Modelo multicriterio propuesto ..... 12

4.4. Modelo de incertidumbre y programa de evaluación ..... 14

**5. Discusión científica ..... 16**

5.1. Representatividad y ponderación del $CO_2$ emitido ..... 16

5.2. Comparación de captación puntual e integrada ..... 17

5.3. Incertidumbre y aplicabilidad reglamentaria ..... 18

**6. Conclusiones ..... 19**

**7. Bibliografía ..... 21**

# Resumen

Determinar qué proporción del $CO_2$ emitido por una instalación es de origen biogénico o fósil requiere algo más que analizar una muestra mediante carbono-14 ($^{14}C$). El principal reto consiste en garantizar que el resultado isotópico represente adecuadamente las emisiones del período considerado, teniendo en cuenta la variabilidad del proceso y la cantidad de $CO_2$ realmente emitida.

Este trabajo presenta el desarrollo de una metodología integral de SGS que combina la planificación del muestreo, la captación y conservación de muestras, el análisis radiocarbónico y la integración de los resultados con las medidas de $CO_2$ total y caudal de gases. Como base experimental, se analizaron 48 determinaciones históricas realizadas entre 2025 y 2026, agrupadas en tres conjuntos de datos. Los resultados muestran una concentración relativamente definida de las determinaciones en torno a sus valores centrales, especialmente en algunos conjuntos, junto con observaciones singulares. Esta aparente estabilidad plantea la necesidad de comprobar hasta qué punto las campañas discretas representan las emisiones de períodos más amplios.

A partir de estos antecedentes, se formularon modelos de balance de masa para la integración temporal de las emisiones y la composición de muestras acumulativas. Asimismo, se desarrolló un modelo multicriterio para evaluar estrategias de captación puntual e integrada mediante requisitos técnicos excluyentes y criterios ponderados. El trabajo incorpora también la identificación de las principales fuentes de incertidumbre y un programa de evaluación metrológica para la futura validación del procedimiento.

La investigación establece una base metodológica para avanzar desde la determinación isotópica de una muestra hacia la cuantificación representativa y trazable de las emisiones de $CO_2$ biogénico y fósil. Su desarrollo puede contribuir a mejorar la comparabilidad de los resultados y los procedimientos de seguimiento ambiental entre instalaciones, especialmente ante la evolución del marco europeo de seguimiento y notificación de emisiones.

**Palabras clave**

$CO_2$ biogénico, carbono-14 ($^{14}C$), radiocarbono, espectrometría de masas con aceleradores (AMS), emisiones estacionarias, muestreo integrado, representatividad temporal, incertidumbre de medida

# 1. Introducción y justificación

La valorización energética de residuos genera emisiones de dióxido de carbono ($CO_2$) procedentes tanto de materiales de origen biogénico como fósil, debido a la composición heterogénea de los residuos tratados. Diferenciar ambas contribuciones resulta fundamental para caracterizar las emisiones de gases de efecto invernadero y proporcionar información fiable para su seguimiento, inventario y notificación. La determinación mediante carbono-14 ($^{14}C$) permite estimar la proporción de carbono biogénico y fósil de una muestra a partir de sus características isotópicas, mediante la aplicación de referencias y correcciones analíticas adecuadas (Mohn et al., 2008, ASTM International, 2024).

Sin embargo, conocer la fracción biogénica de una muestra no significa necesariamente conocer la correspondiente al $CO_2$ emitido durante un trimestre o un año. La representatividad del resultado depende de cuándo y durante cuánto tiempo se realiza la captación, de la variabilidad de las condiciones de operación y de la contribución de cada línea a la masa total de $CO_2$ emitida. Investigaciones previas basadas en muestreos integrados y balances de masa han puesto de manifiesto la importancia de considerar estos factores para caracterizar períodos de emisión prolongados (Mohn et al., 2012, Fuglsang et al., 2014).

En respuesta a esta necesidad, SGS desarrolla una metodología integral que conecta la planificación y ejecución del muestreo, la conservación y trazabilidad de las muestras, el análisis radiocarbónico y la cuantificación de las emisiones biogénicas y fósiles, incorporando la evaluación de incertidumbre de la cadena de medida. El desarrollo toma como referencia ISO 13833:2013 para el muestreo y determinación mediante radiocarbono en emisiones estacionarias, ASTM D6866-24a para el análisis del contenido de carbono biobasado e ISO 18466:2016 como metodología alternativa basada en balances de proceso. Aunque estas referencias abordan aspectos relacionados de la determinación del carbono biogénico, sus ámbitos de aplicación y requisitos son diferentes y deben considerarse de forma complementaria, sin asumir su equivalencia (International Organization for Standardization, 2013, 2016, ASTM International, 2024).

# 2. Objetivos

El objetivo general de este trabajo es desarrollar una metodología integral y trazable para determinar la fracción biogénica del $CO_2$ en emisiones estacionarias, relacionando el análisis isotópico de las muestras con la cuantificación de las emisiones durante un período de referencia y estableciendo los requisitos técnicos y metrológicos necesarios para su futura validación.

Para alcanzar este objetivo, se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. **Caracterizar los antecedentes experimentales disponibles**, analizando descriptivamente la distribución y dispersión de los resultados históricos de carbono biogénico mediante $^{14}C$ y sus implicaciones para la representatividad temporal.

2. **Definir las magnitudes de medida y los modelos de cuantificación**, diferenciando la fracción biogénica determinada en una muestra de la correspondiente a las emisiones de un período y formulando su ponderación por la masa de $CO_2$ emitida.

3. **Evaluar las alternativas de captación puntual e integrada**, identificando sus requisitos técnicos y estableciendo un modelo multicriterio para estructurar su comparación y selección futura.

4. **Establecer una arquitectura integral de medida**, que conecte la planificación y captación en chimenea, la conservación y trazabilidad de las muestras, el análisis isotópico y la integración con las medidas de $CO_2$ total y caudal.

5. **Identificar las fuentes de incertidumbre y definir un programa de evaluación metrológica**, incluyendo los controles y ensayos necesarios para la futura validación del procedimiento integral

# 3. Materiales y métodos

## 3.1. Enfoque y delimitación de información

El desarrollo metodológico se fundamentó en una revisión técnico-documental de normas, publicaciones científicas y documentación técnica relacionada con la determinación mediante radiocarbono, las estrategias de captación, los balances de emisiones y la evaluación de incertidumbre. A partir de esta revisión se definieron los modelos de medida, los criterios para evaluar las alternativas de captación y un programa de ensayos orientado a la futura validación del procedimiento integral. La revisión tuvo un carácter técnico y no se planteó como una revisión bibliográfica sistemática.

Como base experimental se analizaron 48 determinaciones históricas de la fracción biogénica del $CO_2$, realizadas entre 2025 y 2026 y agrupadas en tres conjuntos anonimizados (A, B y C). El análisis se centró en caracterizar la distribución y dispersión de los resultados, con especial atención a la concentración de valores y a la presencia de observaciones singulares, como antecedentes para evaluar la representatividad temporal de las estrategias de muestreo. Se utilizaron los

resultados analíticos originales, sin efectuar un recálculo isotópico independiente. Dado que el análisis no incorpora la masa de $CO_2$ emitida durante los períodos representados, los resultados no constituyen estimaciones ponderadas de las emisiones anuales.

El trabajo permitió establecer una propuesta metodológica y definir los requisitos para su evaluación experimental. La comparación controlada de configuraciones de captación y la cuantificación de la incertidumbre combinada de la cadena integral se contemplan como etapas posteriores del programa de validación.

## 3.2. Configuraciones de captación y estrategia de evaluación

Se analizaron distintas alternativas de captación y conservación de muestras de $CO_2$ destinadas a su posterior determinación mediante carbono-14 ($^{14}C$), considerando tanto campañas puntuales de corta duración como estrategias de muestreo integrado durante períodos prolongados. La revisión se basó en normas aplicables, publicaciones científicas y documentación técnica disponible, sin plantearse como una revisión bibliográfica sistemática. Las prestaciones que no contaban con evidencias verificables se consideraron pendientes de comprobación.

Se identificaron cinco configuraciones principales de captación o retención: bolsas de PVF (Tedlar), bolsas multicapa de barrera, recipientes rígidos estancos, sistemas de absorción alcalina líquida y sistemas de absorción alcalina sólida. También se contempló la captación secuencial, mediante acumulación o mezcla controlada de alícuotas, como una estrategia que puede combinarse con distintos sistemas de retención.

Para analizar su idoneidad se consideraron la compatibilidad con la composición y las condiciones del gas emitido, la cantidad de carbono necesaria para el análisis mediante espectrometría de masas con aceleradores (AMS), la integridad de las muestras, el riesgo de contaminación, la estabilidad durante el transporte y la conservación, la cobertura temporal y la trazabilidad del procedimiento.

La norma ISO 13833:2013 se adoptó como referencia técnica para el muestreo y la determinación radiocarbónica en emisiones estacionarias. Las prestaciones declaradas por los fabricantes se utilizaron como información técnica de referencia, sin considerarlas evidencias de validación experimental en las condiciones de aplicación del proyecto.

Dado que las alternativas presentan características y limitaciones diferentes, se desarrolló el modelo multicriterio de evaluación de estrategias de captación para estructurar su evaluación de forma documentada. El modelo se organiza en dos etapas: una primera de admisibilidad técnica, basada en ocho requisitos excluyentes (E1–E8)y una segunda de valoración mediante ocho criterios ponderados (C1–C8), con pesos diferenciados según se trate de captación puntual o integrada prolongada.

El cumplimiento de todos los requisitos excluyentes constituye una condición necesaria para considerar técnicamente admisible una alternativa. Cuando no se dispone de evidencias suficientes para acreditar alguno de ellos, la alternativa permanece pendiente de evaluación y no puede considerarse seleccionada. Solo las configuraciones admisibles podrán someterse a la valoración ponderada.

Las ponderaciones y escalas del modelo constituyen propuestas metodológicas de SGS, no requisitos establecidos por las normas de referencia. Su aplicación y adecuación deberán contrastarse mediante evidencias técnicas y futuros ensayos comparativos. Por su parte, los requisitos de competencia técnica, aseguramiento de la validez de los resultados y trazabilidad metrológica aplicables a las actividades de laboratorio se consideran en el marco de ISO/IEC 17025:2017 (International Organization for Standardization & International Electrotechnical Commission, 2017).

## 3.3. Definición del mensurando y modelos de medida

La determinación de la fracción biogénica del $CO_2$ requiere distinguir tres magnitudes relacionadas, pero no necesariamente equivalentes: la fracción obtenida mediante el análisis isotópico de una muestra, la fracción correspondiente al $CO_2$ efectivamente captado y la fracción biogénica del $CO_2$ emitido por la instalación durante un período de referencia.

Esta distinción es esencial porque un resultado analítico puede caracterizar correctamente la muestra estudiada sin representar necesariamente las emisiones del período completo. Para establecer esa relación deben considerarse la cobertura temporal de la captación, las variaciones del proceso y la cantidad de $CO_2$ emitida en cada intervalo.

En este trabajo se define como mensurando principal la fracción biogénica del $CO_2$ emitido durante un período $T$, ponderada por la masa de $CO_2$ procedente de todas las líneas incluidas en el perímetro de medida.

### 3.3.1. Modelo de fracción biogénica ponderada por emisiones

De acuerdo con el principio de conservación de masa, la fracción biogénica correspondiente al período de referencia $T$ puede expresarse como:

$$f_{\mathrm{bio},T} = \frac{\sum_{\ell} \int_{T} \dot{m}_{\mathrm{CO_2},\ell}\,(t)\, f_{\mathrm{bio},\ell}(t)\, dt}{\sum_{\ell} \int_{T} \dot{m}_{\mathrm{CO_2},\ell}\,(t)\, dt}$$

Donde:

- $f_{\mathrm{bio},T}$: fracción biogénica del $CO_2$ emitido durante el período $T$, adimensional.
- $\dot{m}_{\mathrm{CO}_2,\ell}(t)$: flujo másico instantáneo de $CO_2$ emitido por la línea $\ell$, expresado en kg/h.
- $f_{\mathrm{bio},\ell}(t)$: fracción biogénica instantánea del $CO_2$ emitido por la línea $\ell$, adimensional.
- $T$: período de referencia de la cuantificación.

**Ecuación (1).** Balance de masa para la determinación de la fracción biogénica del $CO_2$ emitido durante un período de referencia.

Esta formulación expresa que la fracción biogénica del período depende tanto de la composición de las emisiones como de la masa de $CO_2$ emitida en cada momento. Por tanto, las determinaciones correspondientes a distintos intervalos o líneas no tienen necesariamente la misma contribución al resultado global.

La expresión deriva del principio de conservación de masa y no reproduce literalmente una ecuación de ISO 13833:2013. Su aplicación requiere disponer de información representativa sobre la fracción biogénica y el flujo másico de $CO_2$ emitido.

Cuando el período de seguimiento se divide en intervalos para los que se conocen las masas emitidas y se dispone de estimaciones representativas de la fracción biogénica, el modelo continuo puede aproximarse mediante:

$$f_{\mathrm{bio},T} \approx \frac{\sum_{\ell,j} M_{\mathrm{CO}_2,\ell j}\ \hat{f}_{\mathrm{bio},\ell j}}{\sum_{\ell,j} M_{\mathrm{CO}_2,\ell j}}$$

Donde:

- $M_{\mathrm{CO}_2,\ell j}$: masa de $CO_2$ emitida por la línea $\ell$ durante el intervalo $j$, en kg.
- $\hat{f}_{\mathrm{bio},\ell j}$: estimación de la fracción biogénica representativa de dicha línea e intervalo, adimensional.

**Ecuación (2).** Agregación discreta de fracciones biogénicas ponderadas por la masa de $CO_2$ emitida.

Este modelo permite integrar resultados correspondientes a diferentes líneas e intervalos, siempre que estos cubran el período de referencia sin solapamientos ni omisiones relevantes y que las fracciones utilizadas representen adecuadamente las emisiones correspondientes.

En consecuencia, disponer de determinaciones trimestrales no garantiza, por sí solo, que pueda calcularse una fracción biogénica anual representativa.

### 3.3.2. Modelo de composición de una muestra integrada

La captación integrada permite acumular $CO_2$ durante un período prolongado. Sin embargo, la composición de la muestra obtenida depende de la cantidad de $CO_2$ incorporada al sistema en cada momento y de la eficiencia con la que se realiza la captación.

Bajo la hipótesis de que el sistema no discrimina entre el $CO_2$ de origen biogénico y fósil, la fracción biogénica de la muestra acumulada puede expresarse como:

$$f_{\text{capt}} = \frac{\int_T q_s\,(t)\, c_{\text{CO}_2}(t)\, \eta(t)\, f_{\text{bio}}(t)\, dt}{\int_T q_s\,(t)\, c_{\text{CO}_2}(t)\, \eta(t)\, dt}$$

Donde:

- $f_{\text{capt}}$: fracción biogénica del $CO_2$ acumulado en el sistema de captación, adimensional.
- $q_s(t)$: caudal volumétrico de gas extraído, expresado en m³/h.
- $c_{\text{CO}_2}(t)$: concentración másica de $CO_2$ en el gas extraído, en kg/m³.
- $\eta(t)$: eficiencia de captación o retención del $CO_2$, adimensional.
- $f_{\text{bio}}(t)$: fracción biogénica del $CO_2$ presente en el gas extraído, adimensional.

**Ecuación (3).** Modelo de composición de $CO_2$ biogénico en una muestra obtenida mediante captación acumulativa.

Para aplicar este modelo, los caudales y las concentraciones deben expresarse en bases compatibles, considerando especialmente las condiciones de referencia y el contenido de humedad del gas.

La comparación entre las ecuaciones (1) y (3) permite identificar un requisito fundamental de representatividad: para que la muestra integrada reproduzca la fracción biogénica ponderada de las emisiones, la cantidad de $CO_2$ captada en cada momento debe ser proporcional a la masa de $CO_2$ realmente emitida en ese intervalo, además de representar adecuadamente la composición del gas.

Por ello, mantener un caudal de captación constante no garantiza necesariamente una muestra representativa de las emisiones del período, especialmente cuando varían el caudal de chimenea o la concentración de $CO_2$.

### 3.3.3. Modelo de determinación isotópica

Una vez obtenida la muestra, la proporción de carbono de origen biogénico y fósil puede determinarse mediante el análisis de radiocarbono. En una mezcla binaria idealizada, esta relación puede expresarse a partir de las señales isotópicas normalizadas:

$$f_{\text{bio}} = \frac{F_s - F_f}{F_b - F_f}$$

Donde:

- $F_s$: señal radiocarbónica normalizada correspondiente a la muestra.
- $F_b$: señal radiocarbónica normalizada de la referencia biogénica aplicable.
- $F_f$: señal radiocarbónica normalizada de la referencia fósil.

**Ecuación (4).** Balance isotópico de una mezcla binaria idealizada.

Esta expresión representa el fundamento del cálculo isotópico, bajo la hipótesis de que las señales se encuentran expresadas sobre una base comparable y de que las referencias utilizadas son adecuadas para las características de la muestra y el período estudiado.

La determinación analítica requiere, además, aplicar los procedimientos específicos de tratamiento de blancos, referencias isotópicas y correcciones correspondientes al método empleado por el laboratorio.

En el presente desarrollo, este modelo se incorpora como fundamento conceptual de la determinación radiocarbónica. Los resultados históricos utilizados como antecedente experimental se analizaron conforme a los valores comunicados en los informes originales, sin efectuar un recálculo isotópico independiente.

### 3.3.4. Planteamiento de la evaluación de incertidumbre

La cuantificación del $CO_2$ biogénico y fósil requiere considerar no solo la incertidumbre del análisis isotópico, sino también las contribuciones asociadas a la captación de la muestra, su conservación, la representatividad temporal y la determinación de las masas emitidas.

Para estructurar esta evaluación se adoptan los principios de la Guía para la expresión de la incertidumbre de medida (JCGM 100:2008).

Considerando un mensurando $y = g(x_1, \dots, x_n)$, la incertidumbre típica combinada puede expresarse mediante propagación de incertidumbres de primer orden como:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^{n} c_i^2\, u^2(x_i) + 2 \sum_{i<j} c_i\, c_j\, u(x_i, x_j)$$

con:

$$c_i = \frac{\partial g}{\partial x_i}$$

Donde:

- $u_c(y)$: incertidumbre típica combinada del mensurando.
- $u(x_i)$: incertidumbre típica de la magnitud de entrada $x_i$.
- $u(x_i, x_j)$: covarianza entre las magnitudes de entrada $x_i$ y $x_j$.
- $c_i$: coeficiente de sensibilidad asociado a la magnitud $x_i$.

**Ecuación (5).** Ley de propagación de incertidumbres, incluidos los términos de covarianza, conforme a JCGM 100:2008.

La aplicación de esta expresión exige disponer de un modelo de medida definido y de estimaciones justificadas de las incertidumbres de entrada y sus posibles correlaciones. Cuando la aproximación de primer orden no resulte adecuada, deberán considerarse otros procedimientos de propagación, como la propagación de distribuciones.

En el desarrollo metodológico se identificaron las principales fuentes de incertidumbre asociadas al análisis isotópico, los blancos y posibles contaminaciones, la captación y recuperación del $CO_2$, el transporte y conservación de muestras, la proporcionalidad del muestreo, la sincronización de datos, la representatividad espacial y temporal y la cuantificación de las emisiones totales.

Estas contribuciones deberán evaluarse experimentalmente, evitando duplicidades y considerando las posibles covarianzas entre magnitudes obtenidas de fuentes comunes.

Finalmente, debe distinguirse la dispersión de los resultados históricos de la incertidumbre de medida del procedimiento. La desviación estándar entre determinaciones describe la variabilidad observada, pero no puede utilizarse directamente como estimación de la incertidumbre de una fracción biogénica anual.

## 3.4. Validación prospectiva

Para avanzar hacia la validación experimental de la metodología integral, se definió un programa de ensayos destinado a evaluar la fiabilidad de las muestras obtenidas y la representatividad de las estrategias de captación.

El programa contempla la realización de blancos de campo y laboratorio, duplicados de captación independientes y simultáneos, controles de fugas y ensayos de recuperación. Asimismo, se prevé estudiar la estabilidad de las muestras en función del sistema de retención, el tiempo de conservación y la temperatura, con el fin de identificar posibles pérdidas o alteraciones que puedan afectar a la determinación isotópica.

La comparación entre estrategias puntuales e integradas se orientará a evaluar su capacidad para caracterizar las emisiones durante diferentes períodos de referencia. Para ello, será necesario documentar la duración y cobertura temporal del muestreo, las condiciones de operación de la instalación y la evolución del flujo másico de $CO_2$, de manera que pueda analizarse la relación entre la composición de las muestras y las emisiones efectivamente producidas.

Este programa constituye la siguiente fase del desarrollo metodológico y permitirá obtener las evidencias experimentales necesarias para evaluar el comportamiento de las alternativas consideradas y cuantificar las principales contribuciones a la incertidumbre del procedimiento integral.

# 4. Resultados del desarrollo metodológico

## 4.1. Caracterización descriptiva de los antecedentes experimentales

Como punto de partida experimental del desarrollo metodológico, se analizaron 48 determinaciones históricas de la fracción biogénica del $CO_2$ mediante radiocarbono ($^{14}C$), realizadas entre 2025 y 2026 y agrupadas en tres conjuntos identificados como A, B y C.

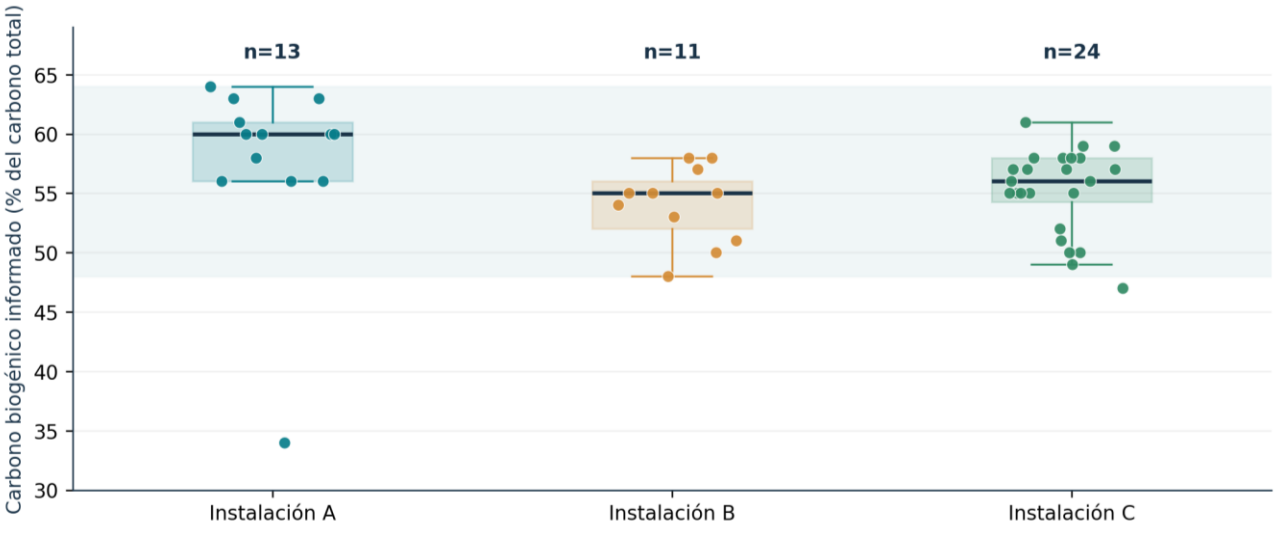



**Figura 1.** Distribución de los resultados históricos de carbono biogénico mediante $^{14}C$ en tres conjuntos de datos anonimizados (2025–2026).
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 1 muestra la distribución de los resultados individuales, mientras que el Cuadro 1 presenta sus principales estadísticos descriptivos, con el fin de caracterizar la concentración de las determinaciones y la influencia de posibles observaciones singulares.

**Cuadro 1.** Estadísticos descriptivos de los tres conjuntos históricos de determinaciones radiocarbónicas (2025–2026).
Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados históricos. RIC: rango intercuartílico (Q3 − Q1, cuartiles tipo 7 según Hyndman y Fan, 1996), DE: desviación estándar muestral. Los estadísticos corresponden a determinaciones discretas y no representan estimaciones anuales ponderadas por emisiones.

| Conjunto | Mediana (%) | RIC (pp) | DE muestral (pp) |
|---|---|---|---|
| **A** | 60,00 | 5,00 | 7,63 |
| **B** | 55,00 | 4,00 | 3,26 |
| **C** | 56,00 | 3,75 | 3,59 |

Los tres conjuntos presentan agrupaciones de resultados en torno a sus valores centrales. Esta concentración es especialmente evidente en B y C, cuyos rangos intercuartílicos son de 4,00 y 3,75 puntos porcentuales, respectivamente y cuyas desviaciones estándar muestrales son inferiores a 4 puntos porcentuales. El conjunto A también muestra un agrupamiento central, aunque presenta una dispersión mayor, influida por una observación singular que se ha conservado en el análisis.

En conjunto, estos resultados ponen de manifiesto una relativa estabilidad descriptiva de las determinaciones disponibles, junto con variaciones puntuales que pueden resultar relevantes para la caracterización de las emisiones. La presencia de valores relativamente próximos entre sí sugiere que, bajo determinadas condiciones, la fracción biogénica observada puede mostrar una variabilidad limitada. No obstante, los datos disponibles no permiten establecer si ese comportamiento se mantiene de forma continua ni identificar las causas de las diferencias observadas.

Desde el punto de vista metodológico, estos antecedentes plantean una cuestión fundamental: determinar hasta qué punto las campañas discretas pueden representar las emisiones generadas durante períodos más amplios. Para responderla, no basta con analizar la dispersión de los resultados isotópicos, también es necesario considerar la cobertura temporal de las captaciones, las condiciones de operación y la masa de $CO_2$ emitida durante los intervalos correspondientes.

Por tanto, la coexistencia de resultados relativamente agrupados y observaciones singulares constituye una base experimental para investigar estrategias de captación puntual e integrada que permitan caracterizar adecuadamente las condiciones habituales de emisión y sus posibles variaciones. Esta necesidad fundamenta los modelos de integración y los criterios de evaluación de alternativas desarrollados en los apartados siguientes.

## 4.2. Arquitectura de la cadena de medida

A partir de los requisitos de representatividad identificados en los antecedentes experimentales y del desarrollo de los modelos de medida, se estructuró una cadena integral para la determinación del $CO_2$ biogénico y fósil en emisiones estacionarias. La propuesta comprende cinco etapas interrelacionadas que abarcan desde la planificación del muestreo hasta la cuantificación de las fracciones y masas emitidas, incluyendo la evaluación de incertidumbre.

**Cuadro 2.** Esquema de la cadena integral de determinación del $CO_2$ biogénico y fósil propuesta por SGS. Fuente: Elaboración propia. Arquitectura metodológica propuesta.

| Plan de muestreo | Captación y conservación | Análisis isotópico | Integración de datos | Resultado e incertidumbre |
|---|---|---|---|---|
| Foco, líneas, período y condiciones de operación | Captación de $CO_2$, blancos, transporte, conservación y custodia | $^{14}C$, pMC, referencias isotópicas y control de calidad | $CO_2$ total, caudal de gases y ponderación por masa emitida | Fracción biogénica/fósil, masas de $CO_2$, incertidumbre y reporte |

La principal aportación de esta arquitectura es que el resultado isotópico no se interpreta de forma aislada, sino que se relaciona con las condiciones de captación y con la cantidad de $CO_2$ emitida durante el período de referencia. De este modo, el procedimiento contempla tanto la calidad analítica de las determinaciones como su representatividad respecto a las emisiones de la instalación.

La integración de estas etapas permite identificar los requisitos técnicos, los controles y la información necesarios para avanzar hacia un procedimiento de medida trazable, cuya evaluación experimental se abordará en las siguientes fases del proyecto.

## 4.3. Modelo multicriterio propuesto

Como resultado del desarrollo metodológico, se estableció un modelo multicriterio para evaluar de forma estructurada y documentada diferentes estrategias de captación destinadas a la determinación de la fracción biogénica del $CO_2$ mediante radiocarbono.

El modelo permite identificar las condiciones técnicas indispensables que debe cumplir cada alternativa y comparar posteriormente sus prestaciones en función de los objetivos del muestreo, diferenciando las necesidades de las captaciones puntuales y las integradas prolongadas.

El modelo se organiza en dos etapas complementarias. La primera consiste en verificar ocho requisitos técnicos excluyentes (E1–E8): compatibilidad con las condiciones del foco, cantidad de carbono recuperable, control de blancos y contaminación, integridad de la muestra, seguridad de operación, cobertura temporal, proporcionalidad respecto a las emisiones y trazabilidad. Estos

requisitos establecen las condiciones mínimas que debe acreditar una alternativa para considerarse técnicamente admisible.

La segunda etapa permite comparar las alternativas admisibles mediante ocho criterios puntuables (C1–C8), valorados en una escala de 0 a 4 y ponderados de forma diferente según se trate de captaciones puntuales o integradas prolongadas. Mientras que los requisitos excluyentes determinan la admisibilidad, los criterios puntuables permiten valorar el grado de desempeño de las configuraciones que han superado dichos requisitos. De este modo, una prestación favorable en determinados aspectos no puede compensar el incumplimiento de una condición técnica esencial.

**Cuadro 3.** Ponderaciones preliminares de los ocho criterios del modelo de evaluación de estrategias de captación (MEC).
Fuente: Elaboración propia. Las ponderaciones representan hipótesis iniciales de diseño de SGS y no constituyen requisitos normativos ni resultados de una comparación experimental de tecnologías.

| Criterio | Puntual (%) | Prolongado (%) |
|---|---|---|
| **C1 Cobertura temporal** | 10 | 22 |
| **C2 Fidelidad de ponderación** | 10 | 23 |
| **C3 Blancos y contaminación** | 20 | 15 |
| **C4 Recuperación y selectividad** | 15 | 12 |
| **C5 Estabilidad isotópica** | 15 | 8 |
| **C6 QA/QC y trazabilidad** | 15 | 10 |
| **C7 Operación y seguridad** | 10 | 7 |
| **C8 Coste por resultado válido** | 5 | 3 |
| **TOTAL** | 100 | 100 |

La asignación de pesos responde a las diferentes necesidades de las dos modalidades de captación. En las campañas puntuales se otorga mayor importancia relativa al control de contaminación, la recuperación y la estabilidad isotópica, aspectos fundamentales para garantizar la calidad de la muestra y del resultado analítico. En las estrategias integradas prolongadas adquieren mayor relevancia la cobertura temporal y la fidelidad de ponderación, al pretenderse obtener un resultado representativo del $CO_2$ emitido durante períodos más amplios.

Esta diferenciación se refleja en el peso conjunto de los criterios C1 y C2, que aumenta del 20 % en la captación puntual al 45 % en la integrada prolongada. En ambas modalidades, los aspectos operativos y económicos reciben una ponderación menor y quedan subordinados al cumplimiento de los requisitos excluyentes.

Para formalizar la comparación, la puntuación global de cada alternativa técnicamente admisible se define mediante:

$$S_a = \sum_{i=1}^{8} (w_i/100) \cdot s_{ai}$$

donde $S_a$ es la puntuación global de la alternativa (a) comprendida entre 0 y 4, $w_i$ el peso porcentual del criterio (i) siendo la suma de los pesos igual al 100 %. y $s_{ai}$ la puntuación asignada a la alternativa (a) en el criterio (i) en una escala de 0 a 4.

***Ecuación (6).*** *Modelo de puntuación ponderada de las alternativas técnicamente admisibles.*

La escala de valoración contempla distintos niveles de desempeño, desde la prestación mínima acreditada para una alternativa admisible hasta niveles superiores de cumplimiento. La asignación efectiva de puntuaciones deberá sustentarse en evidencias verificables y en reglas de valoración específicas para cada criterio, que permitan aplicar el modelo de forma consistente y reproducible.

Las ponderaciones constituyen una propuesta inicial basada en la priorización técnica de los criterios, sin haber sido obtenidas mediante optimización estadística ni validación experimental. Por ello, se prevé realizar un análisis de sensibilidad que permita comprobar hasta qué punto las puntuaciones y la clasificación de alternativas dependen de los pesos establecidos.

Como procedimiento preliminar de comprobación, se propone modificar los pesos individuales en un ±20 % relativo respecto a sus valores iniciales, renormalizarlos para mantener una suma del 100 % y analizar las variaciones en las puntuaciones globales y en el orden de clasificación. Esta evaluación se realizará cuando se disponga de puntuaciones técnicas justificadas para las alternativas consideradas.

El resultado alcanzado en esta fase es la definición de un procedimiento estructurado de evaluación y de sus requisitos de aplicación. La comparación experimental de tecnologías, la asignación de puntuaciones definitivas y el análisis de robustez constituyen etapas posteriores de desarrollo.

## 4.4. Modelo de incertidumbre y programa de evaluación

Como parte del desarrollo de la metodología integral, se identificaron las principales fuentes de incertidumbre y los factores que pueden afectar a la fiabilidad y representatividad de los resultados. Estos elementos abarcan desde la determinación isotópica y la captación de las muestras hasta su conservación, transporte e integración con los datos de $CO_2$ total y caudal de gases.

La evaluación se estructuró considerando las contribuciones asociadas a cada etapa de la cadena de medida, así como las posibles dependencias entre ellas. Este enfoque permite definir los controles y ensayos necesarios para su caracterización, teniendo en cuenta que determinadas magnitudes pueden compartir fuentes de información y presentar correlaciones que deben considerarse para evitar una contabilización incorrecta de la incertidumbre.

La caracterización de estas contribuciones permitirá establecer un presupuesto de incertidumbre del procedimiento integral, considerando las correlaciones pertinentes y evitando contabilizar varias veces una misma fuente de variabilidad. Paralelamente, será necesario evaluar los posibles sesgos

asociados a la representatividad temporal y espacial de las captaciones, que no pueden resolverse únicamente mediante la propagación de incertidumbres analíticas.

En esta fase se han definido las fuentes y los requisitos de evaluación, pero todavía no se dispone de resultados experimentales suficientes para cuantificar la incertidumbre combinada de toda la cadena. En particular, la desviación estándar de las determinaciones históricas caracteriza su dispersión, pero no constituye una estimación directa de la incertidumbre de medida ni de la representatividad anual.

El Cuadro 4 resume las principales contribuciones identificadas, la información actualmente disponible y las comprobaciones previstas para avanzar hacia la evaluación metrológica del procedimiento.

**Cuadro 4.** Fuentes de incertidumbre y factores de representatividad de la cadena integral de medida junto con las comprobaciones necesarias para su evaluación.
Fuente: Elaboración propia. Las evaluaciones y ensayos indicados forman parte del programa de validación prospectivo

| Componente | Información disponible | Ensayo/registro necesario |
|---|---|---|
| **Determinación isotópica mediante AMS** | Resultados analíticos históricos y valores pMC disponibles. | Evaluación de la incertidumbre analítica conforme al método aplicado, incluyendo blancos, referencias y correcciones correspondientes. |
| **Captación y control de contaminación** | Antecedentes de campañas de muestreo. | Duplicados de captación independientes y simultáneos, blancos de campo, controles de fugas y ensayos de recuperación. |
| **Conservación y transporte** | Prestaciones no caracterizadas experimentalmente para todas las configuraciones consideradas. | Ensayos de estabilidad isotópica en función del sistema de retención, tiempo de conservación y temperatura. |
| **Representatividad temporal** | Determinaciones discretas correspondientes a distintos períodos de seguimiento. | Registro de ventanas de captación, condiciones operativas y evolución temporal de las emisiones, incluyendo la evaluación de posibles sesgos de representatividad. |
| **$CO_2$ total y cálculo de masas emitidas** | Modelos de integración y ponderación por masa definidos. | Caracterización metrológica de las medidas de concentración y caudal, sincronización temporal y evaluación de las masas emitidas por línea y período. |

En conjunto, el desarrollo metodológico relaciona tres necesidades fundamentales: comprender la distribución y variabilidad observadas en las determinaciones de $^{14}C$, seleccionar estrategias de captación compatibles con el período de emisiones que se pretende caracterizar e integrar los resultados analíticos con las masas de $CO_2$ emitidas mediante modelos de medida trazables.

La aportación consiste en establecer una arquitectura integral de medida, acompañada de criterios verificables para evaluar las alternativas de captación y de un programa de caracterización metrológica orientado a su futura validación experimental.

# 5. Discusión científica

## 5.1. Representatividad y ponderación del $CO_2$ emitido

La concentración de los resultados históricos de $^{14}C$ en torno a valores relativamente próximos, especialmente en determinados conjuntos, plantea una cuestión fundamental: ¿hasta qué punto esta aparente estabilidad puede considerarse representativa de las emisiones generadas durante un período más amplio? Aunque los resultados muestran una dispersión limitada en algunas campañas, su distribución no permite establecer si esa condición se mantiene a lo largo del tiempo o bajo diferentes regímenes de operación.

La representatividad de las determinaciones no depende únicamente de la calidad del análisis isotópico, sino también de las condiciones y duración del muestreo y de la cantidad de $CO_2$ emitida durante los intervalos representados. Asimismo, las observaciones singulares identificadas en los antecedentes experimentales no pueden atribuirse exclusivamente a variaciones del procesoya que también deben considerarse posibles contribuciones relacionadas con la captación y el análisis.

En este contexto, los estudios de Mohn et al. (2012) y Fuglsang et al. (2014) respaldan el interés de investigar estrategias de muestreo integrado que amplíen la cobertura temporal. Sin embargo, las condiciones de operación y las características de cada instalación impiden extrapolar directamente sus resultados o establecer una frecuencia de muestreo universalmente representativa.

Por ello, la metodología propuesta por SGS relaciona la determinación isotópica con la evolución del flujo másico de $CO_2$ y establece la ponderación por masa emitida como un requisito fundamental para caracterizar las emisiones de un período. Esta relación permite orientar la evaluación de estrategias puntuales e integradas según su capacidad para representar las condiciones reales de emisión.

## 5.2. Comparación de captación puntual e integrada

Los antecedentes experimentales y las limitaciones de representatividad identificadas ponen de manifiesto la necesidad de seleccionar estrategias de captación adecuadas al objetivo de medida y al período de emisión considerado. Aunque el muestreo integrado permite ampliar la cobertura temporal, esta circunstancia no garantiza por sí sola que la composición de la muestra represente la fracción biogénica del $CO_2$ emitido durante dicho período.

Las captaciones puntuales permiten caracterizar condiciones específicas de funcionamiento y resultan útiles para estudiar determinados regímenes de operación. Sin embargo, la extrapolación de sus resultados a períodos prolongados requiere demostrar que las condiciones muestreadas representan adecuadamente las emisiones del intervalo de referencia.

Por su parte, el muestreo integrado permite incorporar información de un período más amplio, siempre que la captación sea representativa de la composición del gas y mantenga una relación adecuada con la masa de $CO_2$ emitida. Su fiabilidad depende de factores como la proporcionalidad de la captación, la recuperación del $CO_2$, la integridad isotópica de las muestras y la continuidad operativa del sistema.

La prolongación del muestreo puede introducir dificultades adicionales, como contaminación, contribuciones de blancos, pérdidas de muestra, variaciones del caudal de captación, saturación de absorbentes o interrupciones del funcionamiento. Estos factores deben evaluarse experimentalmenteya que una mayor duración no implica necesariamente una mejora de la calidad o representatividad del resultado.

En este contexto, el modelo desarrollado por SGS permite estructurar la evaluación de alternativas mediante requisitos técnicos excluyentes y criterios ponderados, diferenciando las necesidades de la captación puntual y la integrada prolongada. De este modo, la integridad de las muestras, la representatividad y la trazabilidad constituyen condiciones prioritarias que no pueden compensarse únicamente mediante ventajas económicas u operativas. Las ponderaciones propuestas tienen carácter preliminar y deberán contrastarse mediante ensayos y análisis de sensibilidad.

La norma ISO 13833:2013 proporciona el marco técnico de referencia para el muestreo y la determinación radiocarbónica en emisiones estacionarias, mientras que ASTM D6866-24a aborda la determinación analítica del contenido de carbono biobasado. Por tanto, la aplicación de un método analítico conforme a ASTM D6866 no demuestra, por sí sola, que la estrategia de captación sea representativa ni que cumpla los requisitos aplicables de ISO 13833 (International Organization for Standardization, 2013. ASTM International, 2024).

## 5.3. Incertidumbre y aplicabilidad reglamentaria

La fiabilidad de la determinación del $CO_2$ biogénico y fósil no depende únicamente de la incertidumbre del análisis isotópico, sino también de las contribuciones asociadas al muestreo, la conservación de las muestras y la cuantificación de las emisiones. La evaluación conforme a los principios del GUM permite integrar las contribuciones pertinentes y sus posibles correlaciones, mientras que la representatividad temporal requiere comprobar que las condiciones de captación reflejan adecuadamente las emisiones del período considerado.

Esta necesidad de representatividad tiene también una dimensión reglamentaria. En el ámbito de las metodologías de seguimiento basadas en medición, el artículo 43.4 del Reglamento de Ejecución (UE) 2018/2066 contempla la utilización de enfoques basados en EN ISO 13833 y métodos alternativos de balance, como ISO 18466, para determinar el $CO_2$ procedente de biomasa. Tras su modificación mediante el Reglamento (UE) 2024/2493, establece que, cuando el método propuesto implique muestreo continuo del flujo de gases de salida, deberá aplicarse EN 15259 y garantizarse un plan de muestreo representativo de todo el año de notificación.

Este marco refuerza la importancia de disponer de procedimientos capaces de relacionar los resultados isotópicos con las condiciones de captación y la masa de $CO_2$ emitida. No obstante, la aplicación del procedimiento desarrollado al EU ETS requerirá evaluar su conformidad con la normativa vigente y el plan de seguimiento autorizado de cada instalación. Asimismo, la fracción biogénica determinada mediante $^{14}C$ no debe equipararse automáticamente a la fracción de biomasa con calificación cero, cuyo tratamiento reglamentario está sujeto a condiciones específicas (Comisión Europea 2018, 2024).

La evolución de la normativa europea incrementa el interés de este tipo de desarrollos. En particular, la propuesta de modificación de la Directiva 2003/87/CE presentada por la Comisión Europea en julio de 2026 contempla la ampliación progresiva del EU ETS a instalaciones de incineración y coincineración de residuos no peligrosos. Aunque su aplicación definitiva dependerá del resultado del procedimiento legislativo, esta iniciativa pone de relieve la importancia de avanzar hacia sistemas de seguimiento, notificación y verificación de emisiones técnicamente sólidos (Comisión Europea, 2026).

Desde esta perspectiva, la metodología propuesta puede contribuir a mejorar la caracterización de las fracciones biogénica y fósil del $CO_2$, el conocimiento de su variabilidad y la evaluación de la representatividad de los resultados. Su desarrollo también abre la posibilidad de realizar estudios comparativos entre instalaciones y de establecer procedimientos de seguimiento más homogéneos, trazables y verificables.

La colaboración entre operadores, entidades técnicas y asociaciones sectoriales permitiría ampliar la base experimental disponible y evaluar el comportamiento de las estrategias de captación en instalaciones con diferentes características y regímenes de operación.

# 6. Conclusiones

1. **El trabajo ha permitido establecer las bases de una metodología integral para determinar y cuantificar el $CO_2$ de origen biogénico y fósil en emisiones estacionarias.** La principal aportación consiste en integrar la planificación y ejecución del muestreo, la conservación y trazabilidad de las muestras, el análisis mediante radiocarbono ($^{14}C$) y los datos de $CO_2$ total y caudal de gases dentro de una misma cadena de medida, incorporando los requisitos necesarios para evaluar la incertidumbre del resultado.

2. **El análisis de las 48 determinaciones históricas ha puesto de manifiesto una concentración relativamente definida de los resultados en determinados conjuntos, junto con la presencia de observaciones singulares.** Este comportamiento sugiere una variabilidad descriptiva limitada en parte de las determinaciones disponibles, pero evidencia también la necesidad de investigar si los resultados de campañas discretas representan adecuadamente las emisiones de períodos más amplios. La concentración observada no constituye, por sí sola, una demostración de estabilidad temporal continua.

3. **La representatividad de una determinación isotópica no depende únicamente de la calidad del análisis, sino también de la estrategia de captación y de su relación con las emisiones reales.** Los modelos de balance de masa formulados permiten diferenciar la fracción biogénica de una muestra de la correspondiente al $CO_2$ emitido durante un período de referencia y establecen la necesidad de considerar la cobertura temporal y la ponderación por masa emitida, especialmente cuando intervienen diferentes líneas o condiciones de operación.

4. **Se ha desarrollado un modelo multicriterio de evaluación de estrategias de captación que diferencia los requisitos técnicos imprescindibles de los criterios de valoración ponderada, permitiendo estructurar la comparación de alternativas en función de su idoneidad para el objetivo de medida.** Las ponderaciones propuestas constituyen hipótesis iniciales de diseño y deberán contrastarse mediante evidencias experimentales y análisis de sensibilidad antes de establecer una clasificación de tecnologías.

5. **La evaluación de incertidumbre debe abarcar toda la cadena de medida y considerar de forma específica los posibles sesgos de representatividad.** El trabajo ha identificado las principales contribuciones y definido un programa de evaluación experimental basado en blancos, duplicados, controles de recuperación, estabilidad de las muestras y comprobaciones de proporcionalidad y sincronización con las emisiones. Su aplicación permitirá avanzar hacia la caracterización metrológica del procedimiento y la cuantificación de su incertidumbre combinada, todavía pendientes de evaluación experimental.

6. **El desarrollo proporciona una base técnica para avanzar hacia procedimientos de determinación del $CO_2$ biogénico y fósil más homogéneos, trazables y comparables entre instalaciones.** Su futura validación y aplicación en diferentes condiciones de operación podrían contribuir a mejorar la caracterización sectorial de estas emisiones y la calidad de la información utilizada en los sistemas de seguimiento ambiental. Esta aportación resulta especialmente relevante ante la evolución del marco europeo de seguimiento, notificación y verificación de gases de efecto invernadero, sin que ello suponga atribuir al procedimiento una conformidad reglamentaria todavía no demostrada. Su eventual utilización en el EU ETS deberá evaluarse conforme a los requisitos aplicables y al plan de seguimiento de cada instalación.

En conjunto, la investigación establece una base metodológica para avanzar desde la determinación isotópica de una muestra hacia la cuantificación representativa y verificable de las emisiones de $CO_2$ biogénico y fósil, contribuyendo al desarrollo de procedimientos de seguimiento ambiental adaptados a las necesidades del sector industrial.

# 7. Bibliografía

[1] ASTM International. (2024). *ASTM D6866-24a: Standard test methods for determining the biobased content of solid, liquid, and gaseous samples using radiocarbon analysis*. https://doi.org/10.1520/D6866-24A

[2] Comisión Europea. (2018). *Reglamento de Ejecución (UE) 2018/2066 de la Comisión, de 19 de diciembre de 2018, sobre el seguimiento y la notificación de las emisiones de gases de efecto invernadero en aplicación de la Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del Consejo y por el que se modifica el Reglamento (UE) n.º 601/2012 de la Comisión* (versión consolidada de 27 de mayo de 2025). EUR-Lex. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2018/2066/2025-05-27

[3] Comisión Europea. (2024). *Reglamento de Ejecución (UE) 2024/2493 de la Comisión, de 23 de septiembre de 2024, por el que se modifica el Reglamento de Ejecución (UE) 2018/2066 en lo que respecta a la actualización del seguimiento y la notificación de las emisiones de gases de efecto invernadero en aplicación de la Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del Consejo*. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2024/2493/oj

[4] Comisión Europea. (2024). *Reglamento de Ejecución (UE) 2024/2493 de la Comisión, de 23 de septiembre de 2024, por el que se modifica el Reglamento de Ejecución (UE) 2018/2066 en lo que respecta a la actualización del seguimiento y la notificación de las emisiones de gases de efecto invernadero en aplicación de la Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del Consejo*. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:52026PC0616

[5] Fuglsang, K., Pedersen, N. H., Larsen, A. W., & Astrup, T. F. (2014). Long-term sampling of $CO_2$ from waste-to-energy plants: $^{14}C$ determination methodology, data variation and uncertainty. *Waste Management & Research, 32*(2), 115–123. https://doi.org/10.1177/0734242X13517159

[6] Hyndman, R. J., & Fan, Y. (1996). Sample quantiles in statistical packages. The American Statistician, 50(4), 361–365. https://doi.org/10.1080/00031305.1996.10473566

[7] International Organization for Standardization. (2013). *ISO 13833:2013: Stationary source emissions—Determination of the ratio of biomass (biogenic) and fossil-derived carbon dioxide—Radiocarbon sampling and determination*. https://www.iso.org/standard/54332.html

[8] International Organization for Standardization. (2016). *ISO 18466:2016: Stationary source emissions—Determination of the biogenic fraction in $CO_2$ in stack gas using the balance method*. https://www.iso.org/standard/62513.html

[9] International Organization for Standardization & International Electrotechnical Commission. (2017). *ISO/IEC 17025:2017: General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*. https://www.iso.org/standard/66912.html

[10] Joint Committee for Guides in Metrology. (2008a). *JCGM 100:2008: Evaluation of measurement data—Guide to the expression of uncertainty in measurement*. https://doi.org/10.59161/JCGM100-2008E

[11] Mohn, J., Szidat, S., Fellner, J., Rechberger, H., Quartier, R., Buchmann, B., & Emmenegger, L. (2008). Determination of biogenic and fossil $CO_2$ emitted by waste incineration based on $^{14}CO_2$ and mass balances. *Bioresource Technology, 99*(14), 6471–6479. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.11.042

[12] Mohn, J., Szidat, S., Zeyer, K., & Emmenegger, L. (2012). Fossil and biogenic $CO_2$ from waste incineration based on a yearlong radiocarbon study. *Waste Management, 32*(8), 1516–1520. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.04.002

CONAMA 2026