

Efecto sumidero de carbono del cultivo de tabaco (*Nicotiana tabacum* L.) producido en Extremadura

Juan Ignacio Gutiérrez-Cabanillas* y Elena Ordiales

Centro Tecnológico Nacional Agroalimentario, CTAEX, Ctra. Villafranco a Balboa, km 1.2, 06195 Villafranco del Guadiana, Badajoz, España.

Resumen

El cultivo de tabaco (*Nicotiana tabacum* L.) tiene una gran importancia socioeconómica en la región de Extremadura. Las plantas de *N. tabacum* fijan dióxido de carbono atmosférico a través de la fotosíntesis, siendo el objetivo de este estudio establecer el balance neto de carbono de esta actividad agrícola. Este estudio se ha realizado en el norte de Extremadura (Jaraíz de la Vera, Cuacos de Yuste y Talayuela), con las variedades PVH 2310, C241, C152 y TH 241. En este trabajo se ha determinado el carbono composicional de las diferentes partes de la planta (hojas, tallo y raíces), y junto con la biomasa producida a lo largo de su ciclo, se ha determinado la cantidad de CO₂ atmosférico fijado. Paralelamente se han calculado las emisiones de gases de efecto invernadero de la fase de campo (cultivo), que ha sido restada a la cantidad de CO₂ fijado por unidad funcional, obteniendo el balance neto de carbono. Con las prácticas habituales de manejo del cultivo de la campaña de 2023, la producción de 1 kg de tabaco fresco tiene un balance positivo medio de 0,6198 kg CO₂, y expresado por unidad de superficie, 1 ha de cultivo de tabaco permite obtener un balance positivo medio de 11.852,13 kg CO₂ ha⁻¹. Teniendo en cuenta las condiciones de este estudio, puede concluirse que la actividad que representa la producción de hojas de tabaco en Extremadura supone un sumidero de carbono positivo, fijando una cantidad de CO₂ atmosférico muy superior al que emite.

Palabras clave: Dióxido de carbono, GEIs, Huella de Carbono, *Nicotiana tabacum* L.

Carbon sink effect of tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) growing in Extremadura

Abstract

Tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) growing has a great socio-economic importance in the region of Extremadura. *N. tabacum* plants capture atmospheric carbon dioxide through photosynthesis, and the objective of this study is to establish the net carbon balance of this agricultural activity. This study was carried out in the north of Extremadura (Jaraíz de la Vera, Cuacos de Yuste and Talayuela), with the varieties PVH 2310, C241, C152 and TH 241. In this work, the compositional carbon of the different parts of the plant (leaves, stem and roots) has been determined, and together with the biomass produced throughout its cycle, the amount of atmospheric CO₂ fixed has been determined. At the same time, greenhouse gas emissions from the field phase (crop) was calculated, which was subtracted from the amount of CO₂ fixed per functional unit, obtaining the net carbon balance. With the usual crop management

* Autor para correspondencia: jgutierrez@ctaex.com

Cita del artículo: Gutiérrez-Cabanillas J.I., Ordiales E. (2024). Efecto sumidero de carbono del cultivo de tabaco (*Nicotiana tabacum* L.) producido en Extremadura. ITEA-Información Técnica Económica Agraria 120(4): 309-324. <https://doi.org/10.12706/itea.2024.007>



practices of the 2023 season, the production of 1 kg of fresh tobacco has an average positive balance of 0.6198 kg CO₂, and expressed per unit of surface area, 1 ha of tobacco crop provides an average positive balance of 11,852.13 kg CO₂ ha⁻¹. Taking into account the conditions of this study, it can be concluded that the activity represented by tobacco leaf production in Extremadura is a positive carbon sink, fixing a higher amount of atmospheric CO₂ than it emits.

Keywords: Carbon dioxide, GHG, Carbon Footprint, *Nicotiana tabacum* L.

Introducción

El tabaco (*Nicotiana tabacum* L.) es una planta herbácea perenne, que solamente se encuentra como cultivo y puede alcanzar una altura de entre 1 a 2 m. *N. tabacum* es una planta originaria de América tropical y subtropical, pero en la actualidad se cultiva comercialmente en todo el mundo (Rawat y Mali, 2013). El tabaco es considerado como un importante cultivo industrial y sus hojas son la principal materia prima en la producción de tabaco (Zhang *et al.*, 2018).

El cultivo de tabaco en España se concentra en Extremadura (Norte de Cáceres), donde se establece más del 98 % de la superficie total de tabaco crudo o en rama. La producción española representa aproximadamente el 19 % de la producción de la Unión Europea, siendo el 2º productor de la UE (solo superado por Italia), y el 0,5 % de la producción mundial. España cuenta con 1.359 productores de hoja de tabaco. Un 94 % se ubican en Extremadura y el 6 % restante se reparten entre Castilla y León, Castilla-La Mancha, Navarra y Andalucía. El tamaño medio de las explotaciones es de 6,4 ha (MAPA, 2022).

La cadena de valor del tabaco, desde el cultivo al punto de venta, genera un impacto económico de unos 3.200 millones de euros de Valor Añadido Bruto (VAB) en la economía española, lo que representa el 0,3 % del Producto Interior Bruto (PIB) español (Rivero *et al.*, 2022). Además, el tabaco es el quinto mayor contribuyente del Estado con una recaudación fiscal que suma unos 9.000 millones de euros al año, el equivalente al 5 % del total

de los ingresos del Estado y al 34 % de los impuestos especiales (Mesa del Tabaco, 2020).

Cabe destacar que el sector tabaquero genera cada año 1.188 empleos directos. Por tanto, el valor económico generado de las producciones tabaqueras es determinante para la continuidad de las oportunidades de trabajo en las zonas de referencia, siendo clave para afrontar de forma eficaz el reto demográfico existente en la región, así como para la preservación de la actividad económica, tanto en fase productiva de campo, como en otras fases posteriores de la cadena de valor y el conjunto de actividades que actúan como proveedores (maquinaria agrícola, suministradores de abonos, empresas de servicios agrarios –laboratorios, certificadoras–, empresas de instalaciones, etc.) (Rivero *et al.*, 2022). De estas cifras se extrae la importancia socioeconómica que tiene el sector del tabaco en Extremadura, situándolo como sector estratégico para el sustento de las comarcas donde se produce (Miranda, 2018).

Por otra parte, la huella de carbono (HC) es un indicador importante para evaluar los impactos en el calentamiento global/cambio climático de un sistema de producción (Wiedmann y Minx, 2008; Yang *et al.*, 2015). La HC puede definirse como “la cantidad de gases de efecto invernadero (GEIs) expresada en términos de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq), emitida a la atmósfera por un individuo, organización, proceso, producto o evento dentro de un límite especificado” (Pandey *et al.*, 2011). El conjunto de GEIs y los límites se definen en función de la metodología adoptada. Se han diseñado diferentes

metodologías para su cálculo, pero las más utilizadas en organizaciones públicas y privadas son el *Green House Gas Protocol (GHG Protocol)* y la norma ISO 14.064-1 (Cano et al., 2023). A modo de ejemplo, el Programa de Naciones Unidas evalúa la consecución de algunas de las metas de los Objetivos de Desarrollo Sostenible bajo la metodología establecida en la norma ISO 14.064-1 (IPCC, 2021; Sachs et al., 2021).

En contrapartida a las emisiones de GEIs, se conoce como sumidero a todo sistema o proceso que extrae de la atmósfera un gas o gases y se almacena. Los ecosistemas vegetales constituyen un proceso natural para sustraer dióxido de carbono atmosférico, ya que por medio de la fotosíntesis el carbono queda fijado en la estructura vegetal (biomasa) donde se mantiene almacenado por largos periodos de tiempo (Zermeño-González et al., 2011; Keenan y Williams, 2018). El CO₂ secuestrado por las plantas es el resultado de las diferencias entre el CO₂ atmosférico absorbido durante el proceso de la fotosíntesis y este mismo gas emitido a la atmosfera durante la respiración (Carvajal et al., 2014; Keenan y Williams, 2018).

En los últimos años, se ha prestado cada vez más atención a los sistemas de producción agrícola debido a su potencial de calentamiento global (Garnett, 2012; Yan et al., 2015). No obstante, todos los ecosistemas agronómicos

secuestran, producen y consumen simultáneamente fuentes de carbono, y un cultivo determinado en un sistema de plantación específico puede actuar como fuente o sumidero neto de carbono en diferentes momentos (Yan et al., 2023).

Teniendo en cuenta la importancia que tiene el cultivo de tabaco en Extremadura, y la cantidad de biomasa que produce, el objetivo de este trabajo es estudiar el efecto sumidero de carbono que pueden tener las plantas de *N. tabacum* en el cómputo de emisiones de CO₂ que se producen en la fase de cultivo del tabaco, y comprobar si este efecto sumidero puede ser suficiente para compensar las emisiones de CO₂ provocadas por esta actividad.

Material y métodos

Material vegetal, localización y condiciones del ensayo

Para llevar a cabo el presente trabajo se realizó un muestreo de campo en 4 parcelas cultivadas de tabaco de las comarcas de La Vera y Campo Arañuelo, en el norte de Extremadura (España). En cada localización se cultivó una variedad diferente y cada agricultor llevó a cabo su manejo habitual de Producción Integrada (Tabla 1). El muestreo de plantas se realizó en la campaña de 2023.

Tabla 1. Características de cada parcela de tabaco muestreada.
Table 1. Characteristics of each tobacco plot sampled.

Variedad/Código	Término municipal	Superficie (ha)	Densidad (plantas ha ⁻¹)	Rendimiento ⁽¹⁾ (kg ha ⁻¹)
PVH 2310	Jaraíz de la Vera	4,28	19481	20775
C 241	Cuacos de Yuste	5,64	18939	13844
C 152	Talayuela	2,71	19380	24107
TH 241	Talayuela	8,23	20000	21911

⁽¹⁾ Rendimiento: rendimiento total de hoja de tabaco en fresco.

Diseño Experimental

Para el estudio se consideró únicamente la producción anual de biomasa de todas las plantas de tabaco analizadas, tanto de la parte aérea (tallos y hojas) como de la raíz (IPCC, 2003). Las hojas se recolectaron ("repele") según la práctica habitual ("por pisos"), con un total de 3 recolecciones (piso inferior, piso central y piso superior). Antes del primer repele, se marcaron aleatoriamente diez plantas en cada localización. Al final de su ciclo de cultivo (tercer repele, del piso superior), también se retiró la totalidad de tallos y raíces. Todos los muestreos fueron realizados 2-3 días antes de la cosecha comercial.

De cada parcela se extrajeron las plantas del suelo con una pala manual, con cuidado de no romper las raíces secundarias, y se colocaron individualmente en bolsas transpirables para su procesamiento. A continuación, se separaron en hoja, tallo y raíz y estas partes se pesaron para determinar su peso en fresco (Figura 1A).

Cada fracción vegetal se secó a 60 °C durante 48-72 h hasta peso constante, para determinar el peso seco y, a continuación, la muestra seca se trituró en una batidora de laboratorio y se pasó por un tamiz de 1 mm (Figura 1B).

La figura 2 muestra las fases que se han llevado a cabo para cumplir el objetivo de este estudio.

Parámetros evaluados

Contenido de carbono de cada fracción de la planta

El porcentaje de carbono (PC) se analizó a partir de submuestras (15-50 mg de peso seco) de hojas, tallos, frutos y raíces con un

microanalizador elemental LECO CHN-628, siguiendo el procedimiento de trabajo interno estándar PNT01. El procedimiento es aplicable a muestras homogéneas, sólidas, no volátiles y líquidas viscosas, que se queman a 950 °C.

Posteriormente, se calculó el contenido de carbono (CC) de la planta mediante la siguiente ecuación, en la que el porcentaje de carbono se relaciona con la biomasa seca (BS) de cada fracción vegetal:

$$CC = (PC_{raíces} \times BS_{raíces}) + (PC_{tallos} \times BS_{tallos}) + (PC_{hojas} \times BS_{hojas}) \quad [1]$$

donde CC es el contenido de carbono de la planta entera (g); PC es el porcentaje de carbono analizado en cada fracción vegetal (g 100g⁻¹); y BS es la cantidad de biomasa seca de cada fracción vegetal (g).

Cantidad de CO₂ atmosférico fijado por las plantas

El secuestro anual de carbono se calcula según el siguiente algoritmo:

$$CO_2 \text{ fijado} = CC \times \frac{44}{12} \quad [2]$$

donde CO₂ fijado es el secuestro de carbono (kg CO₂ planta⁻¹); CC es el contenido de carbono de las plantas (kg C planta⁻¹); y el multiplicador 44/12 convierte el carbono en CO₂ (Lazzerini et al., 2022).

En este estudio se calculó el CO₂ fijado por cada fracción vegetal de la planta, y también teniendo en cuenta la unidad funcional de 1 kg de hoja de tabaco fresco producido, aplicando la siguiente ecuación:

$$CO_2 \text{ fijado por ud. funcional} = \frac{\text{Densidad de plantación} \times CO_2 \text{ fijado por planta}}{\text{Rendimiento}} \quad [3]$$

A



B



Figura 1. Preparación de las muestras. (A) Muestreo de campo (izquierda) y separación de las fracciones vegetales (derecha), (B) Secado de fracciones vegetales (izquierda) y trituración de las fracciones (derecha).

Figure 1. Sample preparation. (A) Field sampling (left) and separation of plant fractions (right), (B) Drying of plant fractions (left) and grinding of fractions (right).

donde la densidad de plantación es el número de plantas cultivadas en 1 ha, el CO_2 fijado por planta se obtiene en la ecuación (2) y el rendimiento es la cantidad total de hoja de tabaco fresco cosechada en 1 ha.

Huella de carbono del cultivo

En este trabajo se ha utilizado la metodología UNE-ISO 14064-1 para el cálculo de la HC de los campos seleccionados, utilizando una calculadora específica para cultivos agrícolas desarrollada por el Ministerio para la Transición Ecológica (MITECO, 2023). El alcance de esta herramienta es 1+2 (emisiones directas + emisiones indirectas debidas al consumo eléctrico). Para ello, fue necesario recopilar todos los datos que se muestran en la Tabla 2.

La unidad funcional de cálculo fue 1 kg de hoja de tabaco fresco producido, obteniéndose las emisiones de CO_2 equivalente ($\text{kg CO}_2\text{eq kg}^{-1}$), que pueden compararse con el carbono fijado por las plantas, cuando se extrapolan a términos de producción (Zhang *et al.*, 2022).

Balance de carbono del cultivo de tabaco

El efecto sumidero de carbono del cultivo de tabaco como compensación de las emisiones producidas por esta propia actividad (Balance de Carbono, BC, kg CO_2 kg de tabaco fresco $^{-1}$) se obtuvo teniendo en cuenta la unidad funcional (1 kg de tabaco fresco producido), restando el resultado obtenido en el secuestro de carbono (CO_2 fijado) del resultado de la HC del cultivo:

$$BC_{\text{cultivo}} = \text{CO}_2_{\text{fijado}} - HC_{\text{cultivo}} \quad [4]$$

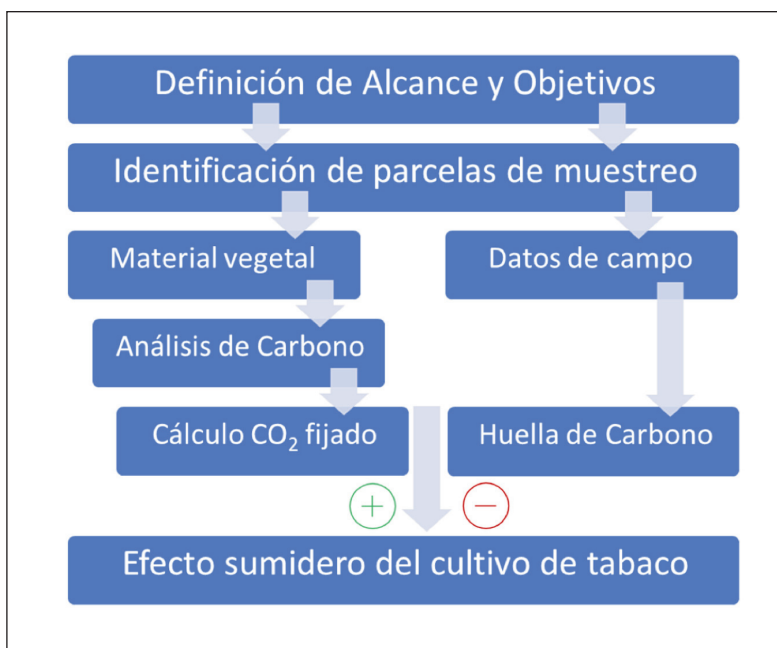


Figura 2. Representación esquemática de las etapas de la investigación.
Figure 2. Schematic representation of the research stages.

Tabla 2. Datos necesarios para el cálculo de la huella de carbono agrícola (UNE-ISO 14064-1).
Table 2. Data required for the calculation of the agricultural carbon footprint (UNE-ISO 14064-1).

Alcance	Tipo de dato	Datos necesarios
1	Datos generales	Provincia, Superficie de parcela (ha) y Producción (kg).
1	Datos del cultivo	Tipo de cultivo, Fertilizantes sintéticos nitrogenados, Estiércoles y purines, Otros abonos (lodos, compost), Enmiendas calizas y Destino de los residuos de cultivo (quema de residuos, incorporación al suelo o retirada de plantas).
1	Emisiones del cultivo	Emisiones indirectas de N ₂ O (lixiviación, escorrentía y deposición atmosférica) ⁽¹⁾ .
1	Combustibles fósiles en parcela	Tipo de instalación, tipo de combustible y cantidad de combustible.
1	Vehículos y maquinaria	Desplazamientos por carretera (Tipo de vehículo, Tipo de combustible y Cantidad de combustible), y Maquinaria agrícola (Labores del suelo, Labores durante el ciclo de cultivo y Labores de recolección).
1	Emisiones fugitivas	Tipo de gas refrigerante, capacidad del equipo y recarga del equipo.
2	Electricidad	Electricidad en parcela (Nombre de la entidad suministradora y Datos de consumo), y Electricidad en vehículos (Nombre de la entidad suministradora y Datos de consumo).

⁽¹⁾ Con la herramienta diseñada por MITECO, las emisiones indirectas de N₂O se calculan automáticamente a partir de los datos anteriores.

Análisis estadístico

Los datos han sido analizados mediante el paquete estadístico SPSS 24.0 (SPSS, IBM Statistics, Armonk, NY, USA). Se realizó un análisis descriptivo con el fin de calcular las medias y el error típico de la media de las mediciones obtenidas para cada parámetro evaluado en el epígrafe 2.3 (variables independientes). Se utilizó el procedimiento MLG (Modelo Lineal General) para llevar a cabo un análisis de la varianza de una vía con las diferentes localizaciones, la densidad de plantación y la variedad cultivada como efectos principales. El nivel de significación estadística se definió como $P < 0,05$. En los casos en que el efecto de algunas de las variables independientes fue significativo, las medias se compararon mediante el test de Tukey ($P < 0,05$).

Resultados y discusión

Porcentaje de carbono de cada fracción de la planta

En la Tabla 3 se muestra el PC que contiene cada fracción de las plantas de tabaco, en cada localización muestreada. El PC de las raíces estuvo comprendido entre 20,17 y 32,33 % C, el del tallo entre 39,51 y 40,65 % C, y el de las hojas entre 38,83 y 39,99 % C. Las diferencias encontradas en el PC de las raíces de las plantas entre parcelas fueron estadísticamente significativas ($P < 0,05$). En cambio, no se encontraron diferencias en el porcentaje de carbono del tallo ni de las hojas ($P > 0,05$). Las plantas con mayor proporción de carbono en la composición de las raíces fueron las de la parcela cultivada con la variedad C 152,

Tabla 3. Porcentaje de carbono (PC) de cada fracción de la planta (raíz, tallo y hojas) de cada variedad muestreada (media $\pm$ error típico).

Table 3. Carbon percentage (PC) of each plant fraction (root, stem and leaves) (mean $\pm$ typical error).

Variedad	PC raíces (%)	PC tallo (%)	PC hojas (%)
PVH 2310	21,88 ^b $\pm$ 3,25	39,51 $\pm$ 0,31	39,93 $\pm$ 0,25
C 241	20,17 ^b $\pm$ 3,16	40,65 $\pm$ 0,39	39,99 $\pm$ 0,33
C 152	32,33 ^a $\pm$ 2,94	39,57 $\pm$ 0,18	38,84 $\pm$ 0,26
TH 241	20,55 ^b $\pm$ 3,41	39,70 $\pm$ 0,35	38,83 $\pm$ 0,45
Significación (P)	*	ns	ns
Promedio	23,73 $\pm$ 3,19	39,86 $\pm$ 0,31	39,40 $\pm$ 0,32

^{a, b} = diferentes letras implican diferencias significativas entre parcelas, $P < 0,05$. Test de Tukey.

mientras que los PC del tallo y de las hojas fueron bastante homogéneos entre las diferentes localizaciones. De media, el tallo y las hojas presentaron mayor PC (39,40-39,86 % C) que las raíces (23,73 % C). Carvajal *et al.* (2014) también encontraron mayores PC en la parte aérea de las plantas de tomate y cereales que en las raíces, aunque en otros cultivos, los PC de las distintas fracciones fueron

similares (pimiento, sandía, crucíferas y árboles frutales, entre otros).

El dato de PC aportado en la Tabla 3 corresponde al valor medio de las tres cosechas realizadas ("repeles"). En la Tabla 4 se muestran los valores de PC de las hojas para cada momento de recolección (R1, R2 y R3). Dentro de cada cosecha, no hubo diferencias significativas en el PC de las hojas entre las distintas

Tabla 4. Porcentaje de carbono (PC) de las hojas de tabaco en cada cosecha (R1, R2 y R3) y de cada variedad muestreada (media $\pm$ error típico).

Table 4. Carbon percentage (PC) of tobacco leaves at each harvest (R1, R2 and R3) (mean $\pm$ typical error).

Variedad	PC hojas R1 (%)	PC hojas R2 (%)	PC hojas R3 (%)	Significación cosecha (P_R)
PVH 2310	37,34 ^z $\pm$ 0,69	40,33 ^y $\pm$ 0,44	42,12 ^x $\pm$ 0,28	***
C 241	37,69 ^y $\pm$ 0,68	40,49 ^x $\pm$ 0,29	41,79 ^x $\pm$ 0,43	***
C 152	36,35 ^y $\pm$ 0,50	39,54 ^x $\pm$ 0,23	40,62 ^x $\pm$ 0,59	***
TH 241	36,44 ^y $\pm$ 0,99	39,61 ^x $\pm$ 0,42	40,44 ^x $\pm$ 0,66	**
Significación parcela (P_p)	ns	ns	ns	
Promedio	36,96 $\pm$ 0,72	39,99 $\pm$ 0,34	41,24 $\pm$ 0,49	

^{a, b} = diferentes letras implican diferencias significativas entre parcelas, $P < 0,05$. Test de Tukey.

^{x, y, z} = diferentes letras implican diferencias significativas entre distintas cosechas dentro de cada parcela, $P < 0,05$. Test de Tukey.

localizaciones ($P_p > 0,05$), con valores medios de 36,96 % C en R1; 39,99 % C en R2 y 41,24 % C en R3. Como puede observarse, de forma generalizada existe un aumento del PC de las hojas en cada cosecha, siendo estas diferencias estadísticamente significativas en todas las localizaciones ($P_R < 0,001$ en variedades PVH 2310, C 241 y C 152; y $P_R < 0,01$ en variedad TH 241). Este resultado es debido a que, a lo largo del ciclo de cultivo, la tasa de acumulación de materia seca por unidad de área foliar (tasa de asimilación neta) va aumentando (Gardner et al., 1985).

Cantidad de CO₂ atmosférico fijado por las plantas de tabaco

En la Tabla 5 pueden observarse las cantidades de CO₂ fijado por cada fracción de la planta y dentro de cada localización, teniendo en cuenta el PC y el peso seco total (BS).

La cantidad de CO₂ fijado en las raíces de las plantas estuvo comprendido entre 82,01 y 172,14 g CO₂ planta⁻¹ (de media, 128,69 g CO₂ planta⁻¹), en el tallo entre 151,57 y 224,25 g CO₂ planta⁻¹ (de media, 199,96 g CO₂ planta⁻¹), en las hojas entre 361,78 y 413,53 g CO₂ planta⁻¹

(de media, 393,97 g CO₂ planta⁻¹), y en la totalidad de la planta entre 595,36 y 796,74 g CO₂ planta⁻¹ (de media, 722,32 g CO₂ planta⁻¹). Como puede observarse, la fracción de biomasa con mayor contenido de CO₂ fijado fueron las hojas de tabaco.

La cantidad de CO₂ fijado en las raíces fue superior en la parcela cultivada con la variedad C 241, mientras que las raíces de las plantas de la variedad PVH 2310 fueron las que menor cantidad de CO₂ pudieron fijar ($P < 0,05$). Teniendo en cuenta los valores de PC de las raíces (Tabla 3), cabría esperar una mayor fijación de CO₂ en las raíces de las plantas de la variedad C 152. En cambio, los resultados obtenidos indican que el peso de las raíces fue significativamente superior en la variedad C 241, contrarrestando el menor PC en su composición.

Con respecto a la cantidad de CO₂ fijado en el tallo, también hubo diferencias significativas entre localizaciones ($P < 0,05$), obteniendo un mayor grado de fijación de CO₂ en los tallos de las plantas de las variedades C 241 y C 152. A nivel composicional, el PC de los tallos fue muy homogéneo entre parcelas (Tabla 3), por lo que al igual que sucediera

Tabla 5. Cantidad de CO₂ atmosférico fijado por cada fracción de la planta de tabaco (g CO₂ planta⁻¹) de cada variedad muestreada (media ± error típico).
Table 5. Amount of atmospheric CO₂ fixed per tobacco plant fraction (g CO₂ plant⁻¹) (mean ± typical error).

Variedad	CO ₂ Raíces (g CO ₂ planta ⁻¹)	CO ₂ Tallo (g CO ₂ planta ⁻¹)	CO ₂ Hojas (g CO ₂ planta ⁻¹)	CO ₂ Total (g CO ₂ planta ⁻¹)
PVH 2310	82,01 b ± 13,43	151,57 b ± 4,52	361,78 ± 17,42	595,36 b ± 18,62
C 241	172,14 a ± 38,85	224,25 a ± 25,70	400,35 ± 26,76	796,74 a ± 61,92
C 152	115,66 ab ± 11,17	220,57 a ± 14,10	413,53 ± 16,85	749,76 a ± 35,08
TH 241	144,95 ab ± 19,00	202,24 ab ± 13,81	400,21 ± 17,39	747,40 a ± 30,66
Significación (P)	*	*	ns	**
Promedio	128,69 ± 20,61	199,66 ± 14,53	393,97 ± 19,60	722,32 ± 36,57

a, b = diferentes letras implican diferencias significativas entre parcelas, $P < 0,05$. Test de Tukey.

con las raíces, se puede concluir que los tallos de las plantas de las variedades C 241 y C 152 tuvieron un mayor desarrollo.

En cuanto a la cantidad de CO_2 fijado en las hojas de tabaco, no existieron diferencias estadísticamente significativas entre parcelas ($P > 0,05$), siendo ésta la fracción de la planta donde se fijó la mayor cantidad de CO_2 atmosférico (de media, el 54,54 % del total de la planta). Parvin *et al.* (2020) encontraron resultados similares en leguminosas, donde las hojas fijaron más de la mitad de CO_2 del total de la planta, sin haber diferencias con distintas condiciones de crecimiento.

Teniendo en cuenta la totalidad de la planta, las diferencias en la cantidad de CO_2 fijado por parte de las raíces y de los tallos se tradujeron en una mayor captación de CO_2 fijado en las plantas de las variedades C 241, C 152 y TH 241 ($P < 0,01$), con valores muy si-

milares en estas tres localizaciones, y con un valor promedio de $722,32 \text{ g CO}_2 \text{ planta}^{-1}$.

Referido a la unidad funcional (1 kg de tabaco en fresco), en este ensayo, la producción de 1 kg de hoja de tabaco fresco lleva asociada la fijación de entre 0,5583 y 1,0900 kg CO_2 , con un valor promedio de fijación de $0,7333 \text{ kg CO}_2 \text{ absorbido kg tabaco fresco}^{-1}$ (Figura 3). En este caso, la mayor cantidad de CO_2 absorbido por unidad funcional fue en la parcela cultivada con la variedad C 241 ($P < 0,001$). Esto es debido a que en esta parcela los rendimientos fueron significativamente inferiores al resto, unido al hecho de que se mantuvo a la cabeza en los parámetros de CO_2 fijado en la totalidad de la planta (Tabla 5). También puede concluirse que el déficit de producción de esta variedad fue compensado por una mayor cantidad de CO_2 fijado por parte de las raíces y de los tallos en esta localización.

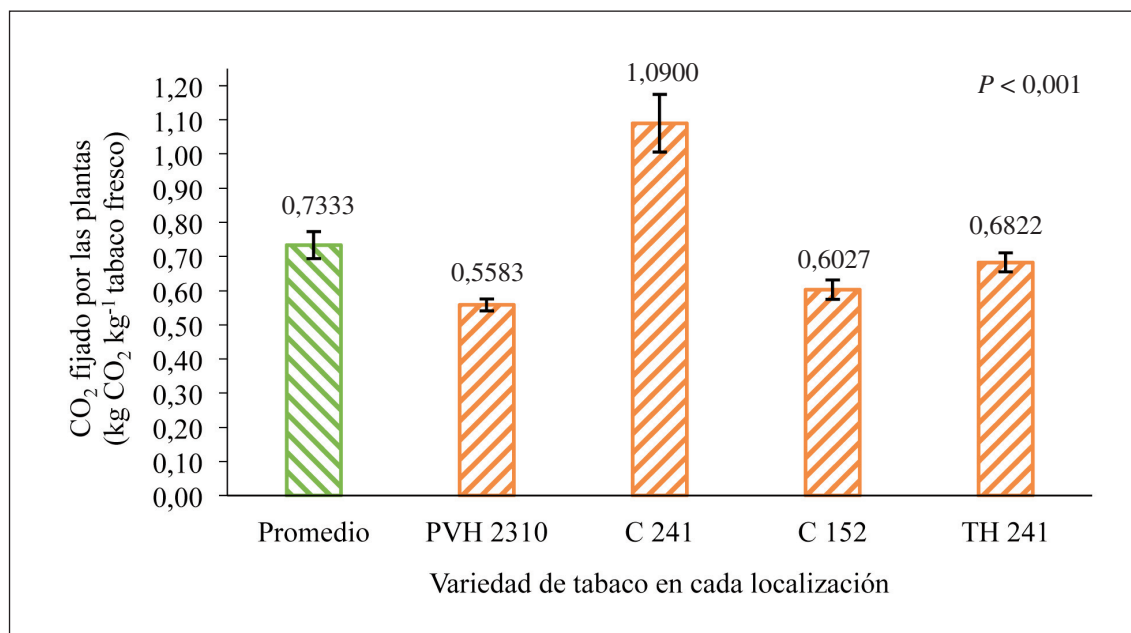


Figura 3. Dióxido de carbono (CO_2) fijado en las plantas por unidad funcional (1 kg de hoja de tabaco en fresco) en cada localización.

Figure 3. Carbon dioxide (CO_2) fixed in plants per functional unit (1 kg of fresh tobacco leaf) at each location.

Huella de carbono del cultivo

En la Figura 4A se muestran los cálculos de HC de cada una de las localizaciones ensayadas, es decir, la totalidad de GEIs emitidos por el cultivo durante el ciclo, y expresados en kg de CO₂ equivalente.

En las condiciones de este estudio, por cada kilogramo de hoja de tabaco en fresco (TF) producido se emitieron en campo entre 0,0644 y 0,1754 kg CO₂eq kg TF⁻¹ (0,1135 kg CO₂eq kg TF⁻¹ de media).

En la Figura 4B puede observarse que, dentro de todas las fuentes de emisión de GEIs del cultivo, la aplicación de fertilizantes sintéticos nitrogenados y la gestión de los residuos de cultivo fue la principal fuente de emisión de CO₂eq. Estos resultados concuerdan con los establecidos por Boettcher *et al.* (2020) al tener en cuenta todo el ciclo de vida del tabaco. En otros estudios, la principal fuente de emisión de la fase de campo fue la quema de los restos de cultivo (Gutiérrez-Cabanillas *et al.*, 2022), ya que esta actividad aumenta significativamente la huella de carbono de la actividad agrícola (Jaiswal y Agrawal, 2020). En el cultivo de tabaco, esta práctica no es habitual, además de estar muy restringida en la Unión Europea dentro de las medidas de la Política Agraria Común (Nikolić-Popadić, 2022).

Boettcher *et al.* (2020) comprobaron que la etapa de producción de tabaco en campo es la de mayor aporte de emisiones de GEIs de esta actividad, alcanzando valores del 85,92-87,30 %, muy superior a las etapas de producción de semillas, el curado y el procesado industrial.

Balance de carbono del cultivo de tabaco

En la Figura 5 se muestran los resultados del efecto del cultivo de tabaco como sumidero de CO₂ en cada localización (balance de carbono, BC), es decir, la diferencia entre la can-

tidad de CO₂ fijado de la atmósfera por parte de las plantas y la cantidad de CO₂ equivalente emitido por esta actividad agrícola.

El BC del cultivo estuvo comprendido entre 0,4938 y 0,9146 kg CO₂ kg TF⁻¹, con un valor medio de 0,6198 kg CO₂ kg TF⁻¹. Es decir, la producción de 1 kg de tabaco fresco tiene un balance positivo medio de 0,6198 kg CO₂. Las diferencias encontradas en este rango fueron estadísticamente significativas ($P < 0,001$) entre localizaciones, observando un mayor efecto sumidero en la parcela cultivada con la variedad C 241. En todas las localizaciones se compensaron ampliamente las emisiones de CO₂ producidas por el cultivo de tabaco. Zhang *et al.* (2022) también llegaron a conclusiones similares, realizando un estudio exhaustivo sobre el sector del tabaco en China.

Finalmente, considerando 1 ha de cultivo como unidad funcional para el cálculo del efecto sumidero de esta actividad, los valores estuvieron comprendidos entre 10.259,47 y 13.219,05 kg CO₂ ha⁻¹, con un valor medio de 11.852,13 kg CO₂ ha⁻¹ (Figura 6). Por tanto, 1 ha de cultivo de tabaco, en las condiciones de este ensayo, permite obtener un BC medio positivo de 11.852,13 kg CO₂ ha⁻¹. Aunque las diferencias entre localizaciones no fueron tan acusadas como en la unidad funcional de TF, de nuevo hubo diferencias estadísticamente significativas entre localizaciones ($P < 0,05$), siendo en este caso la parcela cultivada con la variedad TH 241 donde se evidenció un mayor efecto sumidero de CO₂ por cada hectárea cultivada de tabaco. Así, en todas las localizaciones se compensaron ampliamente las emisiones de CO₂ producidas en campo, referidas a la unidad funcional de 1 ha de cultivo de tabaco. Extrapolando estos resultados a una sola planta, teniendo en cuenta los datos de densidad de plantación aportados en la Tabla 1, cada planta de tabaco tendría un balance positivo de entre 0,5266 y 0,6686 kg CO₂ planta⁻¹, con un valor medio de 0,6094 kg CO₂ planta⁻¹.

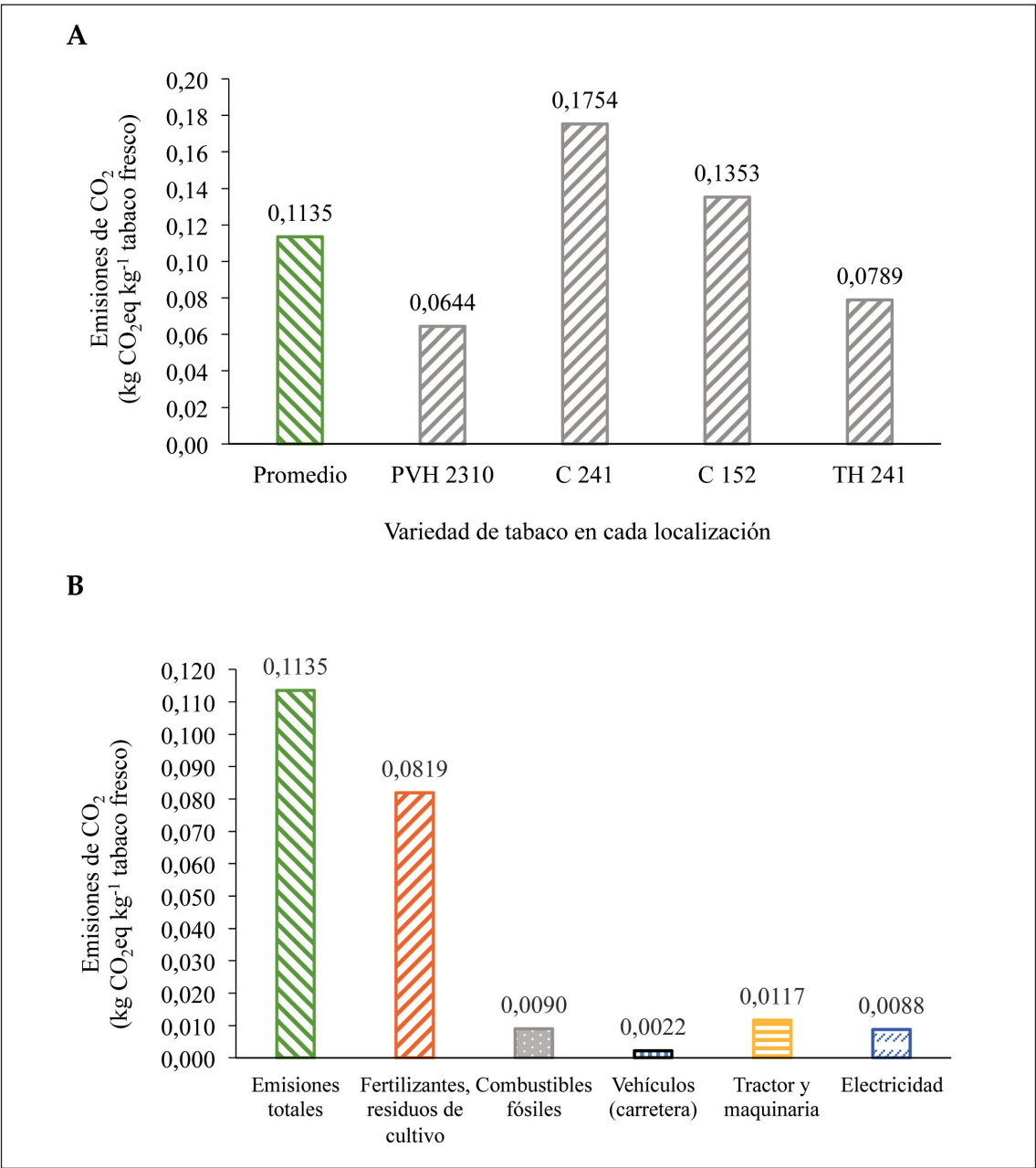


Figura 4. Huella de carbono de las parcelas muestreadas (kg CO₂eq kg⁻¹ tabaco fresco). (A) Huella de carbono total en cada localización para la producción de 1 kg de tabaco, (B) Huella de carbono media de cada actividad agrícola en la producción de tabaco.

Figure 4. Carbon footprint of the sampled plots (kg CO₂eq kg⁻¹ fresh tobacco). (A) Total carbon footprint at each location for the production of 1 kg of tobacco, (B) Average carbon footprint of each agricultural activity in tobacco production.

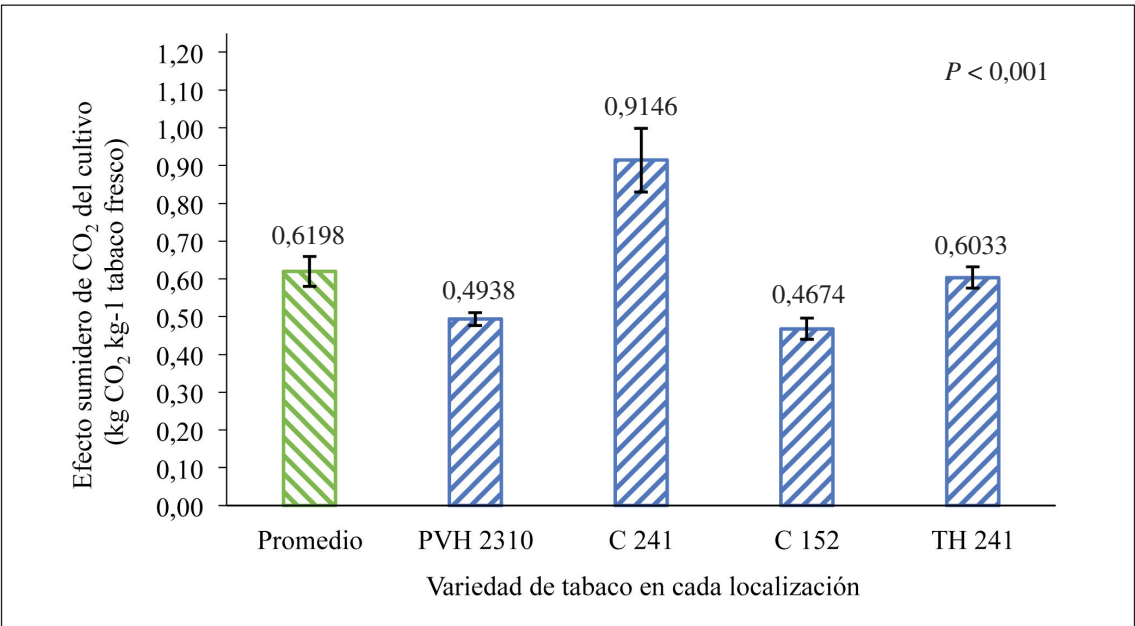


Figura 5. Balance de carbono (efecto sumidero de CO₂) del cultivo de tabaco por unidad funcional (1 kg de hoja de tabaco en fresco) en cada localización.
Figure 5. Carbon balance (CO₂ sink effect) of tobacco growing per functional unit (1 kg of fresh tobacco leaf) at each location.

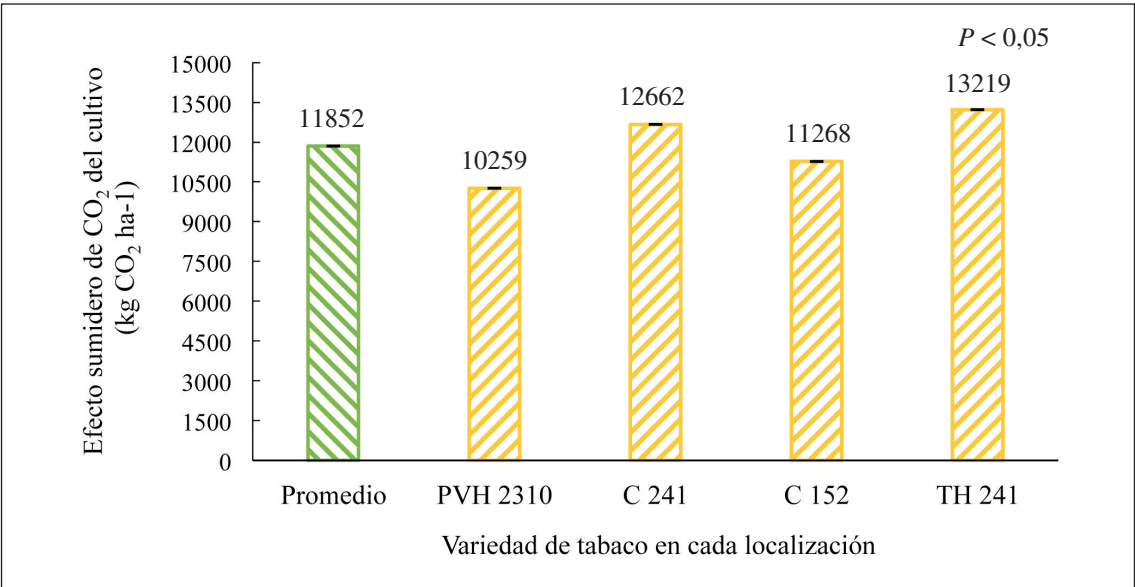


Figura 6. Balance de carbono (efecto sumidero de CO₂) del cultivo de tabaco por hectárea de cultivo en cada localización.
Figure 6. Carbon balance (CO₂ sink effect) of tobacco growing per hectare of crop at each location.

Conclusiones

Las hojas son la fracción de la planta de tabaco que mayor contenido de CO₂ fija de la atmósfera, seguido del tallo y de las raíces, aumentando el porcentaje de carbono a medida que avanza el ciclo. El total de CO₂ fijado por las plantas de tabaco, de media, fue de 722,32 g CO₂ planta⁻¹. La producción de 1 kg de tabaco en fresco lleva asociada un valor promedio de fijación de 0,7333 kg CO₂. La huella de carbono media de las localizaciones analizadas fue de 2.189,40 kg CO₂eq ha⁻¹. En las condiciones de este estudio, por cada kilogramo de hoja de tabaco en fresco producido se emitieron en campo 0,1135 kg CO₂eq. En la evaluación del balance de carbono del cultivo, puede concluirse que la producción de 1 kg de tabaco fresco tiene un balance positivo medio de 0,6198 kg CO₂, y expresado por unidad de superficie, 1 ha de cultivo de tabaco permite obtener un balance positivo medio de 11.852,13 kg CO₂ ha⁻¹. Teniendo en cuenta las condiciones de este estudio, puede concluirse que la actividad que representa la producción de hojas de tabaco en Extremadura supone un sumidero de carbono positivo, fijando una cantidad de CO₂ atmosférico muy superior al que emite.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Compañía Española de Tabaco en Rama S.A. (CETARSA) la financiación del proyecto que ha permitido la realización de los trabajos experimentales recogidos en la presente publicación. Además, agradecen a Octavio Torollo y Antonio Bollo (CETARSA) su inestimable ayuda, así como a todos los agricultores que cedieron sus parcelas de cultivo para la realización del estudio.

Referencias bibliográficas

- Boettcher R., Zappe A.L., de Oliveira P.F., Machado Ê.L., de Assis Lawisch-Rodriguez A., Rodriguez-Lopez D.A. (2020). Carbon Footprint of agricultural production and processing of tobacco (*Nicotiana tabacum*) in southern Brazil. *Environmental Technology & Innovation* 18: 100625. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100625>
- Cano N., Berrio L., Carvajal E., Arango S. (2023). Assessing the carbon footprint of a Colombian University Campus using the UNE-ISO 14064-1 and WRI/WBCSD GHG Protocol Corporate Standard. *Environmental Science and Pollution Research* 30: 3980-3996. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22119-4>
- Carvajal M., Mota C., Alcaraz-López C., Iglesias M. (2014). Investigación sobre la absorción de CO₂ por los cultivos más representativos de la Región de Murcia. Disponible en: http://www.lesco2.es/pdfs/noticias/ponencia_cisc_espanol.pdf (Consultado: 19 febrero 2024).
- Gardner F.P., Brent Pearce R., Mitchel R.L. (1985) Carbon fixation by crop canopies. En: *Physiology of Crop Plants*, (Ed. Gardner F.P., Brent Pearce R., Mitchel R.L.), pp. 31-57. Iowa State University Press.
- Garnett T. (2012). Three perspectives on sustainable food security: efficiency, demand restraint, food system transformation. What role for LCA? 8th International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-Food Sector, 1-4 octubre, Saint-Malo, Francia. pp. 15-25.
- Gutiérrez-Cabanillas J.I., Olivera J.M., de Tena J.M., Zajara L., Gil J., Llerena-Ruiz J.L., Ordiales E. (2022). TomPrint Operational Group: cloud computing tool for calculating the carbon footprint of processing tomato. *Acta Horticulturae* 1351: 291-298. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2022.1351.42>.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2003). Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC. 590 pp.

- IPCC (2021). Summary for policymakers. En: Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. (Ed. V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K., Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou), pp. 3-32. Cambridge University Press Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>
- Jaiswal B., Agrawal M. (2020). Carbon footprints of agriculture sector. En: Carbon Footprints. Environmental Footprints and Eco-design of Products and Processes (Ed. Muthu S.), pp 81-99. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-7916-1_4
- Keenan T.F., Williams C.A. (2018). The terrestrial carbon sink. Annual Review of Environment And Resources 43: 219-243. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102017-030204>
- Lazzerini G., Manzini J., Lucchetti S., Nin S., Nicese F.P. (2022). Greenhouse Gas Emissions and Carbon Sequestration from Conventional and Organic Olive Tree Nurseries in Tuscany, Italy. Sustainability 14: 16526. <https://doi.org/10.3390/su142416526>
- MAPA (2022). Anuario Estadística 2022, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. 1311 pp. Disponible en: https://www.mapa.gob.es/estadistica/pags/anuario/2022/GLOBAL_2022/AE_2022.pdf (Consultado: 26 de febrero 2024).
- Mesa del Tabaco (2020). Informe sobre la contribución económica y social del sector de tabaco en España y tendencias en el marco regulatorio del sector. 85 pp. Disponible en: <https://www.mesadeltabaco.com/public/Attachment/2020/12/MesadelTabaco-InformesobrelacontribucioneconomicaysocialdelsectordetabacoenEspa2020.pdf> (Consultado 26 de febrero 2024).
- Miranda R. (2018). El sector del tabaco en rama: una visión global desde Extremadura. En: La agricultura y ganadería extremeñas, informe 2017. (Ed. Coletto Martínez J.M., González Blanco R., Muslera Prado E., Pulido García F.) pp. 101-112. Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales, Escuela de Ingenierías Agrarias y Caja de Badajoz. España.
- MITECO (2023). Calculadoras del Ministerio para la Transición Ecológica (MITECO). Disponibles en: <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/calculadoras.html> (Consultado: 19 febrero 2024).
- Nikolić-Popadić S. (2022). Prohibition on the burning of crop residues on agricultural land. Glasnik Advokatske komore Vojvodine 94(2): 465-510.
- Pandey D., Agrawal M., Pandey J.S. (2011). Carbon footprint: current methods of estimation. Environmental monitoring and assessment 178: 135-160. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1678-y>
- Parvin S., Uddin S., Tausz Posch S., Armstrong R., Tausz M. (2020). Carbon sink strength of nodules but not other organs modulates photosynthesis of faba bean (*Vicia faba*) grown under elevated [CO₂] and different water supply. New Phytologist 227(1): 132-145. <https://doi.org/10.1111/nph.16520>
- Rawat A., Mali R.R. (2013). Phytochemical properties and pharmacological activities of *Nicotiana tabacum*: A review. Indian Journal Of Pharmaceutical And Biological Research 1: 74-82. <https://doi.org/10.30750/ijpbr.1.2.9>
- Rivero P., Ramajo J., Miranda F.J. (2022). Estudio de costes de producción del tabaco en Extremadura, su viabilidad y su incidencia económica en las zonas rurales donde se cultiva. Consejería de Agricultura. Junta de Extremadura. 50 pp.
- Sachs J., Kroll C., Lafortune G., Fuller G., Woelm F. (2021). Sustainable development report 2021. Cambridge University Press, Cambridge. 518 pp. <https://doi.org/10.1017/9781009106559>
- Wiedmann T., Minx J. (2008). A definition of 'Carbon Footprint'. En: Ecological Economics Research Trends (Ed. Pertsova C.C.), pp. 1-11. Nova Science Publishers, Hauppauge NY, USA.
- Yan M., Cheng K., Luo T., Yan Y., Pan G., Rees R.M. (2015). Carbon footprint of grain crop production in China - based on farm survey data. Journal of Cleaner Production 104: 130-138. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.058>

- Yan Z., Wang J., Liu Y., You Z., Zhang J., Guo F., Gao H., Li L., Wan S. (2023). Maize/peanut intercropping reduces carbon footprint size and improves net ecosystem economic benefits in the Huang-Huai-Hai Region: A four-year study. *Agronomy* 13: 1343. <https://doi.org/10.3390/agronomy13051343>
- Yang J., Chen J., Yang R., Tang J., Huang H. (2015). Research progress of factors influencing the yield and quality of flue-cured tobacco. *Agricultural Science & Technology* 16: 820-825.
- Zermeño-González A., Ríos-Estudillo J.A., Gil-Marín J.A., Cadena-Zapata M., Villarreal-Quintanilla J.A. (2011). Dinámica del flujo de bióxido de carbono y de energía sobre un pastizal natural del norte de México. *Bioagro* 23(1): 35-42.
- Zhang L., Zhang X., Ji H., Wang W., Liu J., Wang F., Xie F., Yu Y., Qin Y., Wang X. (2018). Metabolic profiling of tobacco leaves at different growth stages or different stalk positions by gas chromatography-mass spectrometry. *Industrial Crops and Products* 116: 46-55. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.02.041>.
- Zhang Y., Wang H., Zhou T., Li Z., Jia X. (2022). Extended carbon emission pinch analysis for the low-carbon tobacco industry. *Energies* 15: 4611. <https://doi.org/10.3390/en15134611>

(Aceptado para publicación el 6 de junio de 2024)