

Matorral mediterráneo como sumidero de carbono para la mitigación del cambio climático

Paula Carrión-Prieto¹, Salvador Hernández-Navarro¹, Luis F. Sánchez-Sastre¹, Pablo Martín-Ramos², Fermín Garrido-Launaga³, José L. Marcos-Robles¹, Zacarías Clérigo Pérez¹ and Jesús Martín-Gil¹

¹ Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal, ETSIIAA, Universidad de Valladolid

² Departamento de Ciencias Agrarias y del Medio Natural, EPSH, Universidad de Zaragoza

³ Departamento de Producción Vegetal y Recursos Forestales, ETSIIAA, Universidad de Valladolid

Resumen

Las masas de matorral juegan un papel muy importante en la reducción de CO₂ atmosférico, dada su capacidad de actuación como sumideros de carbono, contribuyen de manera significativa en la lucha contra el cambio climático, teniendo en consideración la extensión que ocupan en nuestros montes, el abandono de su aprovechamiento y el peligro potencial que supone en materia de incendios forestales.

Es por ello que se pretende cuantificar y analizar el contenido de carbono y nitrógeno de dos especies de matorral representativas de la Península Ibérica, *Cistus ladanifer* L. y *Erica arborea* L.; no sólo atendiendo a la variabilidad entre ellas, sino también entre las diferentes fracciones de biomasa dentro de cada especie, haciendo énfasis en la determinación de la biomasa radical.

Los resultados permiten concluir que la distribución de la biomasa y, por tanto, de la absorción de CO₂, es significativamente diferente en las dos especies de matorral bajo estudio, subrayando la importancia de la estimación de la biomasa radical.

Palabras clave

Cistus ladanifer L.; *Erica arborea* L.; dióxido de carbono; sumideros de CO₂; cambio climático; matorral mediterráneo.

Introducción

Bajo las condiciones adecuadas, los montes desempeñan una función muy importante en la reducción del CO₂ atmosférico en su capacidad de actuación como sumideros de carbono [1]. Sin embargo, la eficiencia de las actividades llevadas a cabo con el objetivo de reducirlo deben mantener un balance positivo de carbono absorbido frente al emitido, por lo que se requiere la capacidad de estimación de estas cantidades y la adquisición del mayor conocimiento posible sobre la dinámica del carbono [2]. Es en este contexto donde se desarrolla la presente línea de investigación, dentro del proyecto "Operación CO₂" del programa LIFE+ de la Unión Europea -LIFE11 ENV/ES/000535-, cuyo objetivo principal es demostrar la viabilidad de los proyectos forestales y agroforestales en el secuestro de carbono en Europa, extendiendo la economía verde de créditos de carbono como alternativa de desarrollo futuro y contribuyendo de manera significativa en la lucha contra el cambio climático.

Según Montero *et al.* [3], en España se cuenta con muy poca información sobre las formaciones de arbustados y matorrales [4-10]. Ruiz-Peinado *et al.* [11], insiste en la función de los matorrales, los cuales proporcionan refugio y forraje en los sistemas agrosilvopastorales con recursos de agua limitados, ayudan en el control de la erosión, mantienen la biodiversidad, diversifican el paisaje y, sobre todo, facilitan la regeneración arbórea. Los matorrales pioneros se han convertido en dominantes debido al abandono de los campos agrícolas y el incremento de la frecuencia de incendios en las últimas décadas [12]. Por otro lado, la capacidad de absorción de carbono de los matorrales podría ayudar a mitigar los efectos del cambio climático ya que constituyen una gran proporción de biomasa [11].

Algunos estudios han demostrado la existencia de una cierta variabilidad del contenido de carbono entre especies y, también, entre diferentes fracciones de biomasa [3, 10, 13-15] aunque, en conjunto, la media se aproxime al 50% -valor medio ofrecido por Kollman [16] y aceptado por el IPCC-. Dada la importancia ecológica de estas formaciones y su extensión en los montes peninsulares, es necesario cuantificar el ratio diferencial de biomasa y de carbono, y del contenido de nitrógeno, a niveles inter e intraespecíficos. En el presente estudio se han evaluado dos especies de matorral características de la Península Ibérica: *Cistus ladanifer* L. y *Erica arborea* L., según las fracciones en las que se componen. Con el fin de minimizar el uso de datos inadecuados y poco fiables, las muestras seleccionadas se han desarrollado bajo las mismas condiciones, teniéndose en especial consideración la parte radical, puesto que estudios con métodos inadecuados la subestiman, obteniendo valores menores de la proporción root:shoot (*R*) [17]. Esta relación es un factor de expansión que permite deducir la biomasa subterránea a partir de mediciones de biomasa aérea [18]. Por lo tanto, al basarse en la cantidad de biomasa y carbono, proporciona valores más cercanos a la realidad en el cálculo de existencias de carbono, en la producción y en la productividad de los ecosistemas.

Material y métodos

Localización y recogida de muestras

El estudio se ha desarrollado en el municipio de Ayoó de Vidriales, en la provincia de Zamora (Castilla y León, España). De clima continental –propio de la meseta norte de la Península Ibérica- tiene temperaturas extremas e inviernos largos y fríos y veranos frescos; las precipitaciones son escasas y representan ~440 mm anuales. El área elegida tiene una vegetación mixta de matorral, cuyas especies predominantes son *Erica arborea* L. (*Ea*) y *Cistus ladanifer* L. (*Cl*).

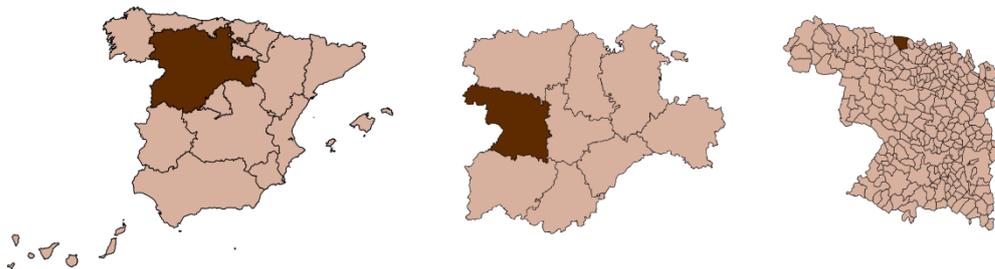


Figura 1. Localización de la zona de estudio: Congosta, Ayoó de Vidriales, Zamora, España.

Se ha seguido una metodología directa para los análisis de biomasa y carbono, la cual implica la destrucción de la muestra, un proceso más laborioso pero a su vez, más preciso; a diferencia de los métodos indirectos, que usan modelos de regresión para estimar la biomasa y el carbono almacenado a través de la medición de otras variables.

Muestras de ambas especies fueron recogidas, atendiendo a que los individuos seleccionados estuvieran sanos y fueran de características similares al resto de la población. Posteriormente se procedió a su apeo y a la extracción de la parte subterránea: ambas partes –aérea y radicular- se separaron mediante una sierra y, siguiendo el procedimiento de Ruiz-Peinado *et al.* [11], el sistema radical se obtuvo con la ayuda de un tractor con un pico acoplado y unas piquetas para completar el trabajo manualmente. Para cada planta, se excavó un círculo alrededor con un diámetro equivalente a dos veces su corona; además del grueso de la raíz, se recogieron aquellas que permanecían en el agujero. Las muestras se trasladaron íntegras a laboratorio (instalaciones de la ETSIIAA de la Universidad de Valladolid, España), donde se separaron por fracciones y pesaron en verde. En el caso de *Cistus ladanifer* fueron clasificadas en hojas, frutos, ramas finas (con un diámetro comprendido entre 3 y 7 mm), materia gruesa (de 7-17 mm de diámetro) y raíces. Por otro lado, *Erica arborea*, dada su morfología y la imposibilidad de separación de las hojas, se dividió en cuatro fracciones: hojas con flores y frutos, materia fina (<1 cm), materia gruesa (<5 cm) y raíces, de acuerdo con Mello *et al.* [19].

Contenido de materia seca

Se determinó empíricamente el contenido de materia seca (biomasa) mediante la extracción de submuestras de cada fracción. Las fracciones de las partes aéreas se secaron en estufa a una temperatura de $102 \pm 2^\circ\text{C}$ hasta peso constante, momento en el cual se considera que el contenido de agua es nulo. La parte radical, debido a su envergadura, fue pesada una vez su humedad se equilibró con el ambiente (seco al aire) y se contrastó el resultado con el de una fracción de la misma secada en estufa. El porcentaje de materia seca para cada componente fue calculado, al igual que en Mello *et al.* [19], con la siguiente expresión:

$$\% \text{ Materia seca} = \frac{B_{\text{seca}}}{B_{\text{húmeda}}} \times 100 \quad [\text{Ec. 1}]$$

donde B_{seca} es biomasa seca (g) and $B_{\text{húmeda}}$ es biomasa ambiente (g)

Posteriormente, se molió cada fracción en un molino de bolas y se tamizó para obtener polvo de 1 mm, no obstante, los frutos de la jara y los elementos gruesos del tallo requirieron de una prensa hidráulica, dada la resistencia de su estructura al molido. Estos requerimientos son precisos para el análisis CHN.

Relación Root:shoot

Definido en 2006 por el IPCC [18] como la relación entre la biomasa de la parte subterránea (*root*) y la de la parte aérea (*shoot*). Los ratios root to shoot pueden aplicarse tanto a plantas individuales como a masas mayores; en la mayoría de los estudios suelen considerarse constantes o de valores específicos de especie/área [20]. La expresión es la siguiente:

$$R = \frac{W_{root}}{W_{shoot}} \quad [\text{Ec. 2}]$$

donde R es la relación root:shoot (magnitud adimensional), W_{root} es el peso seco de la raíz y W_{shoot} es el peso seco de la parte aérea (g).

La importancia del uso de este ratio como indicador de la relación entre la biomasa subterránea (biomasa radical) y la biomasa aérea (compuesta por el sumatorio de hojas, ramas finas y materia gruesa) radica en que permite estimar el carbono almacenado en la biomasa subterránea mediante un sencillo estudio biométrico de la biomasa aérea, con un coste mucho menor [21]. Es necesario tener ratios realistas de root:shoot para mejorar la estimación de biomasa radical y así estimar los efectos de la ordenación del monte y el cambio de usos del suelo en los inventarios nacionales de emisión de gases de efecto invernadero [17].

Las ecuaciones para obtener el valor de R pueden variar de proyecto a proyecto. Suelen utilizarse valores estándar individuales, sin embargo, se sabe que estos factores pueden variar dependiendo de las especies, la fase de crecimiento y el lugar: el ratio R de biomasa de plantas adultas de ecosistemas mediterráneos tiende a ser mayor que en los ecosistemas más templados, posiblemente debido a una adaptación a la temporada de sequía del verano [22, 23]. Es por ello que los cálculos se han realizado, al igual que Sanquetta *et al.* [24], bajo condiciones específicas e idénticas para las muestras de las dos especies consideradas.

Determinación de carbono y nitrógeno en laboratorio

La determinación de la concentración tanto de carbono como de nitrógeno se ha determinado con el analizador LECO CHN-2000 (LECO Corp., Saint Joseph, MI, USA). Para el calibrado del analizador se prepararon cuatro repeticiones de 0.09 a 0.12 g de ácido etilendiaminotetraacético al 99% (CAS No. 60-00-4), adquirido a Alfa Aesar (Thermo Fisher (Kandel) GmbH, Karlsruhe, Germany); mientras que el peso de las muestras de jara (*Cl*) y brezo (*Ea*) se mantiene constante, 0.10 g en la báscula de precisión. Se envuelven de forma individual en láminas de estaño y se les da forma de esfera, posteriormente se colocan en un muestreador automático que las va introduciendo en el equipo. El sistema automatizado realiza la combustión de las muestras a una temperatura de 900°C, tras lo cual recoge los productos restantes de la combustión (CO₂, H₂O, O₂, N₂ and NO_x). Los niveles de CO₂ y H₂O se monitorizan con

dos detectores infrarrojos -selectivos y no dispersivos- independientes, y el N₂ se determina mediante un detector de conductividad térmica. El aparato ofrece de forma directa los resultados con el peso compensado, dando el porcentaje de contenido de carbono y nitrógeno de cada fracción. Son abundantes los estudios acerca de la distribución del nitrógeno en las plantas, probándose que cambia en función de la especie y el periodo del año; sin embargo, hay una fuerte relación lineal entre la concentración de nitrógeno de la planta y la fracción de biomasa correspondiente a las hojas [22, 25]:

$$P \cdot S = \frac{dN}{dt} = aN \quad [\text{Eq. 3}]$$

donde P es la fotosíntesis neta, S la fracción de masa correspondiente a las hojas, N la concentración de nitrógeno y a es una constante.

Resultados y discusión

Distribución de la biomasa y relación root-to-shoot

La figura 2 muestra cómo se distribuye la biomasa en cada planta: *C. ladanifer* tiene 20.7% de hojas y cápsulas, 28.5% de ramas finas, 32.6% de ramas gruesas y 18.2% de raíces; frente a *E. arborea* con 3.8% de hojas, 19.9% de ramas finas, 40.9% de ramas gruesas y 35.4% de raíces (representadas en la figura según la dirección horaria). Es por ello que, en *C. ladanifer* la biomasa aérea (representada por 3.98 g), supone aproximadamente el 81.8% de la masa seca total, mientras que la parte subterránea –raíces- (representada por 0.89 g), el 18.2%. Por otro lado, la biomasa radical de *E. arborea* (8.06 g) representa el 35.3% de la masa seca total, siendo el 64.6% restante (14.72 g) la parte correspondiente a la biomasa aérea.

Por lo tanto, los ratios root-to-shoot, calculados como los cocientes de 18.2 entre 81.8 y 35.8 entre 64.6, fueron de $R=0.22$ para *C. ladanifer* y $R=0.55$ para *E. arborea*.

La distribución de la biomasa –y por ende de absorción de carbono- difiere en las dos especies bajo estudio: mientras que en *C. ladanifer* la biomasa y el carbono asimilado eran aproximadamente similares en cada una de las fracciones en las que fue dividida, en *E. arborea* se observaron diferencias significativas entre las diversas fracciones. Este hecho se hace evidente a partir de los valores de R : mientras que la parte aérea de la primera representa más del 80% del peso seco de la planta, en la segunda representa el ~65%. No obstante, se puede atribuir a las características de los matorrales analizados, tales como el láudano presente en las hojas de la planta perteneciente a la familia *Cistaceae* o el desarrollo de un sistema radicular capaz de sostener el porte arbóreo, propio de la planta perteneciente a la familia *Ericaceae*. Además, debería tenerse en cuenta que, bajo determinadas condiciones ambientales, la fenología refleja la estrategia que sigue cada planta para así asimilar los nutrientes y crecer, afrontando la alternancia de estaciones favorables y desfavorables [26].

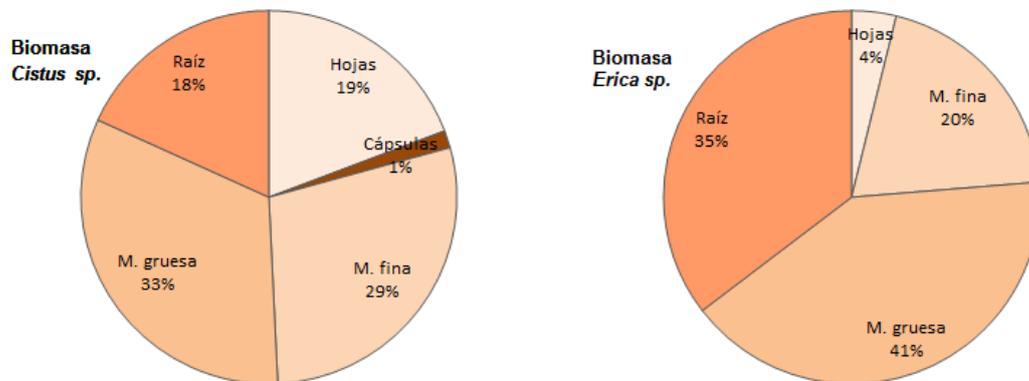


Figura 2. Distribución de la biomasa de *Cistus ladanifer* L. y *Erica arborea* L.

Concentración de carbono y nitrógeno, ratio root:shoot

Se analizó la concentración de carbono para cada uno de los componentes de los dos matorrales (Tabla 1). El valor del contenido de carbono no varía de manera significativa respecto a las partes aérea y radical (aunque es ligeramente más alto en las hojas), con valores de $48.38 \pm 1.02\%$ en *C. ladanifer* y $50.56 \pm 1.38\%$ en *E. arborea*. Estos valores concuerdan perfectamente con los ofrecidos por Montero *et al.* [3] para la parte aérea de las mismas especies ($49.70 \pm 0.66\%$ y $51.43 \pm 1.17\%$, respectivamente), según los valores del Mapa Forestal Español 1:25,000 (MFE25) ($49.64 \pm 1.04\%$ y $50.57 \pm 1.62\%$, respectivamente) y muy cercanos al 50% propuesto por el IPCC [18].

Tabla 1. Contenido de C, contenido de N y relación C:N de *C. ladanifer* y *E. arborea*.

	<i>Cistus ladanifer</i> L.				<i>Erica arborea</i> L.			
	Leaves	Thin branches	Thick branches	Roots	Leaves	Thin branches	Thick branches	Roots
C content (mg·g ⁻¹)	500.72 (0.37)	481.20 (0.27)	475.60 (0.59)	477.76 (0.47)	528.20 (0.22)	493.38 (0.13)	502.62 (0.31)	498.24 (1.23)
N content (mg·g ⁻¹)	18.89 (0.02)	8.42 (0.00)	2.66 (0.18)	3.62 (0.02)	10.46 (0.03)	3.41 (0.18)	3.78 (0.04)	3.40 (0.16)
C:N ratio	26.50 (0.05)				50.52 (0.14)			

Todos los valores se corresponden con la media ± desviación estándar (en paréntesis) de cinco réplicas. Se ha omitido el valor de las cápsulas de *Cistus ladanifer* dada su baja representatividad y con el fin de permitir las comparaciones entre componentes de ambas especies.

En relación con el contenido de nitrógeno por unidad de masa, fue máxima en las hojas en ambas especies ($18.89 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ y $10.46 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ para *C. ladanifer* y *E. arborea*, respectivamente). La variabilidad en los contenidos de N en las hojas entre *Cl* y *Ea* (Tabla 1) puede ser explicada a través de la ecuación 3, debido al hecho de que la fracción de masa foliar es sustancialmente mayor en *C. ladanifer* que en *E. arborea* y la fotosíntesis neta es tres veces mayor en Abril-Mayo en las especies del género *Cistus* (*Cistus incanus*) que en las especies del género *Erica* (*Erica multiflora*), de acuerdo con Catoni y Gratani [27]. La distribución del contenido de nitrógeno, que se asemeja a una pirámide invertida, alcanza el máximo en las hojas, y va disminuyendo paulatinamente a medida que nos acercamos a la raíz, donde el contenido es el mínimo registrado. Esta afirmación

es coherente con los resultados de García Rosa [10] para fracciones de *C. ladanifer* en distintos grupos de edad. No obstante, el valor obtenido en este estudio (1.89%) es mayor al aportado por García Rosa [10], en torno a 0.91%.

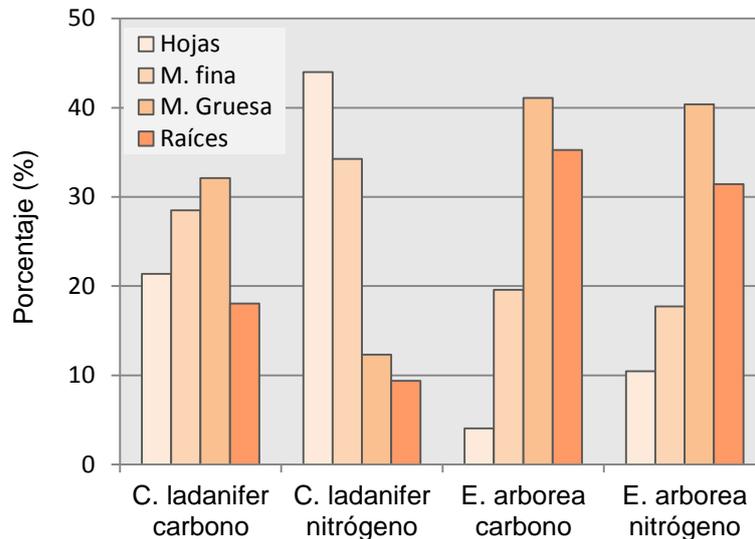


Figura 3. Contribución de los distintos componentes a los reservorios de carbono y nitrógeno, para *C. ladanifer* and *E. arborea*, partiendo de la distribución de biomasa.

En la jara, tras el contenido foliar, la fracción que presenta mayor contenido de nitrógeno son las ramas finas ($8.42 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$) –cantidad sustancialmente menor-, seguidas de las raíces ($3.62 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$) y de las ramas gruesas ($2.66 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$). Por el contrario, en el brezo las hojas son seguidas por las ramas gruesas ($3.78 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$), por las ramas finas y por las raíces (con valores casi idénticos, 3.41 y $3.40 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, respectivamente). Si se analiza el contenido de nitrógeno considerando la biomasa de cada fracción (Figura 3), puede observarse que el comportamiento es profundamente diferente en cada especie: los valores para las fracciones analizadas de *C. ladanifer* siguen el orden: hojas > ramas finas > ramas gruesas > raíces, mientras que se invierten prácticamente en *E. arborea*: ramas gruesas > raíces > ramas finas > hojas.

Conclusiones

En el presente trabajo se muestra el estudio realizado en dos especies de matorral ampliamente extendidos en el área mediterránea y de gran importancia ecológica, *Cistus ladanifer* y *Erica arborea*. El análisis elemental confirma que el porcentaje de carbono en las fracciones de las partes aéreas y radical no difiere de manera significativa, luego el uso de 0.5 como valor global de contenido de carbono en la planta puede considerarse apropiado para ambas especies. Sin embargo, el porcentaje de distribución de la biomasa varía significativamente entre ellas. En cuanto al almacenamiento de carbono, dado que el contenido de éste no depende de la fracción analizada sino que está relacionado directamente con la biomasa, se puede cuantificar de forma directa a través de la biomasa aérea (relativamente fácil de determinar) mediante la relación root to shoot. De esta forma, al tener en cuenta las formaciones radiculares, los reservorios de carbono son mayores. Formaciones vegetales como *C. ladanifer* y *E. arborea*, son dos especies

de matorral claves para la mitigación del Cambio Climático, así como idóneas en el campo de la restauración ecológica, especialmente en suelos pobres.

Referencias

- [1] R. T. Watson and I. R. Noble, "Carbon and the Science-Policy Nexus: The Kyoto Challenge," in *Challenges of a Changing Earth*. vol. Part II, W. Steffen, J. Jäger, D. J. Carson, and C. Bradshaw, Eds., ed Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2002, pp. 57-64.
- [2] G. Orellana-Rivadeneira, M. L. Sandoval-Saolís, G. Linares-Fleites, N. E. García Calderón, and J. V. Tamariz-Flores, "Description of the carbon dynamics in forest soils using a model of reservoirs," *Avances en Ciencias e Ingeniería*, vol. 3, pp. 123-135, 2012.
- [3] G. Montero, M. Pasalodos-Tato, R. Montoto, E. Lopez-Senespleda, R. Onrubia, A. Bravo-Oviedo, *et al.*, "Contenido de Carbono en la biomasa de las principales especies de matorral y arbustados de España," in *6º Congreso Forestal Español* Vitoria-Gasteiz, Spain, 2013, p. 11.
- [4] P. Blanco Oyonarte and R. M. Navarro Cerrillo, "Aboveground phytomass models for major species in shrub ecosystems of western Andalusia," *Forest Systems*, vol. 12, pp. 47-55, 2003.
- [5] I. Castro, M. Á. Casado, L. Ramírez-Sanz, J. M. d. Miguel, M. Costa, and F. Díaz Pineda, "Funciones de estimación de la biomasa aérea de varias especies del matorral mediterráneo del centro de la península Ibérica," *Orsis : Organismes i Sistemes*, vol. 11, pp. 107-116 1996.
- [6] R. M. Navarro, "Fitomasa aérea en los ecosistemas de matorral en el monte Can Vilallonga (T.M. DE Cassà de la Selva-Girona)," *Ecología*, vol. 18, pp. 99-112, 2004.
- [7] R. M. N. Cerrillo and P. B. Oyonarte, "Estimation of above-ground biomass in shrubland ecosystems of southern Spain," *Investigación agraria. Sistemas y recursos forestales*, vol. 15, pp. 197-207, 2006.
- [8] A. Mendoza-Ponce and L. Galicia, "Aboveground and belowground biomass and carbon pools in highland temperate forest landscape in Central Mexico," *Forestry*, vol. 83, pp. 497-506, 2010.
- [9] D. Paton, R. Osorio, P. Azocar, H. Bote, A. Matas, and J. Tovar, "Prediction of browsing biomass of certain shrub species from arid Mediterranean climate of North Chile by multicriteria analysis," *Archivos de zootecnia*, vol. 46, pp. 225-237, 1997.
- [10] M. García Rosa, "Estudio de la biomasa de *Cistus ladanifer* L. y *Retama sphaerocarpa* L. como sumidero de CO₂: existencias y potencialidad," Universidad de Extremadura, 2013.

- [11] R. Ruiz-Peinado, G. Montero, and M. Del Rio, "Biomass models to estimate carbon stocks for hardwood tree species," *Forest Systems*, vol. 21, pp. 42-52, 2012.
- [12] R. M. Masalles and J. Vigo, "La successió a les terres mediterrànies: sèries de vegetació," in *Ecosistemes terrestres: la resposta als incendis i a d'altres perturbacions*. vol. 10, J. Terradas, Ed., ed Barcelona, Spain: Diputació de Barcelona, 1987, pp. 27-43.
- [13] J. Gayoso A and J. Guerra C, "Contenido de carbono en la biomasa aérea de bosques nativos en Chile," *Bosque (Valdivia)*, vol. 26, pp. 33-38, 2005.
- [14] Y. J. Lin, C. P. Liu, and J. C. Lin, "Measurement of specific gravity and carbon content of important timber species in Taiwan," *Taiwan Journal of Forest Science*, vol. 17, pp. 291-299, 2002.
- [15] J. C. Alías Gallego, M. García Rosa, C. Valares Masa, T. Sosa Díaz, and N. Chaves Lobón, "El matorral como sumidero de carbono," in *V Congreso Forestal Español*, Ávila, Spain, 2009.
- [16] F. Kollman, *Tecnología de la madera y sus aplicaciones* vol. 2. Madrid, Spain: Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias y Servicios de la madera. Ministerio de Agricultura, 1959.
- [17] K. Mokany, R. J. Raison, and A. S. Prokushkin, "Critical analysis of root:shoot ratios in terrestrial biomes," *Global Change Biology*, vol. 12, pp. 84-96, 2006.
- [18] IPCC, *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Agriculture, Forestry and Other Land Use* vol. 4. Hayama, Japan: IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme - Institute for Global Environmental Strategies, 2006.
- [19] A. de Mello, L. Nutto, K. Weber, C. Sanquetta, J. Monteiro de Matos, and G. Becker, "Individual biomass and carbon equations for *Mimosa scabrella* Benth. (bracatinga) in southern Brazil," *Silva Fennica*, vol. 46, pp. 333-343 2012.
- [20] J. Wang, B. Duan, and Y. Zhang, "Effects of experimental warming on growth, biomass allocation, and needle chemistry of *Abies faxoniana* in even-aged monospecific stands," *Plant Ecology*, vol. 213, pp. 47-55 2011.
- [21] H. J. Schenk and R. B. Jackson, "Rooting depths, lateral root spreads and below-ground/above-ground allometries of plants in water-limited ecosystems," *Journal of Ecology*, vol. 90, pp. 480-494, 2002.
- [22] D. W. Hilbert, "Optimization of Plant Root: Shoot Ratios and Internal Nitrogen Concentration," *Annals of Botany*, vol. 66, pp. 91-99, 1990.
- [23] F. Lloret, C. Casanovas, and J. Penuelas, "Seedling survival of Mediterranean shrubland species in relation to root:shoot ratio, seed size and water and nitrogen use," *Functional Ecology*, vol. 13, pp. 210-216, 1999.

-
- [24] C. R. Sanquetta, A. P. D. Corte, and F. da Silva, "Biomass expansion factor and root-to-shoot ratio for Pinus in Brazil," *Carbon Balance and Management*, vol. 6, pp. 1-8, 2011.
 - [25] G. I. Agren and T. Ingestad, "Root: shoot ratio as a balance between nitrogen productivity and photosynthesis," *Plant, Cell and Environment*, vol. 10, pp. 579-586, 1987.
 - [26] A. P. Castro-Díez, G. Montserrat-martí, J. H. C. Cornelissen, and S. P. Ecology, "Trade-offs between phenology, relative growth rate, life form and seed mass among 22 Mediterranean woody species," *Plant Ecology*, vol. 166, pp. 117-129 2003.
 - [27] R. Catoni and L. Gratani, "Variations in leaf respiration and photosynthesis ratio in response to air temperature and water availability among Mediterranean evergreen species," *Journal of Arid Environments*, vol. 102, pp. 82-88, 2014.