

CARBON SINKS ASSOCIATED WITH *POSIDONIA OCEANICA* MEADOWS

Carbon sinks are natural or artificial reservoirs in which carbon can be accumulated for a certain length of time. Since the beginning of the industrial era, carbon emissions resulting from human activities ($9.1 \cdot 10^9 \text{ tC a}^{-1}$ in Canadell *et al.*, 2007) have significantly affected the planet's carbon cycle (e.g. global warming and acidification of the oceans). These emissions come from the increasing use of natural carbon wells (hydrocarbons, coal, peat).

Although carbon stored in coastal vegetation (blue carbon) is not taken into account in the Kyoto Protocol, several studies point to the major role played by these sinks in carbon sequestration. Seagrasses play a major role as they are estimated to account for 40% ($50 \cdot 10^6 \text{ tC a}^{-1}$) of the carbon stored each year by shoreline vegetation (Nelleman *et al.*, 2009).

Organic carbon buried in sediment comprises the main sink for *Posidonia oceanica*. *Posidonia oceanica* has a high primary production (45 to $542 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ in Mateo *et al.*, 2006). The proportion of this production buried in sediment and the mat (dead sheaths, rhizomes and roots), is estimated on average to be 30 % of total production (Pergent *et al.*, 1994).

LOS SUMIDEROS DE CARBONO ASOCIADOS A LAS PRADERAS DE *POSIDONIA OCEANICA*

Se entiende por sumidero de carbono cualquier depósito natural o artificial en que el carbono pueda quedar acumulado durante un cierto tiempo. Desde el comienzo de la era industrial, las emisiones de carbono de origen antrópico ($9.1 \cdot 10^9 \text{ tC a}^{-1}$; Canadell *et al.*, 2007) han afectado significativamente al ciclo del carbono de nuestro planeta (por ejemplo el calentamiento global y la acidificación de los océanos). Estas emisiones provienen de la quema acelerada de sumideros naturales de carbono (petróleo, carbón, turba, bosques).

Aunque el carbono almacenado por la vegetación litoral (carbono azul) no está incluido en las estimas del Protocolo de Kioto, estudios recientes sugieren que puede tener un papel esencial en el secuestro de carbono. De entre esta vegetación, las Magnoliofitas marinas podrían desempeñar un papel fundamental pudiendo ser responsables del 40 % ($50 \cdot 10^6 \text{ tC a}^{-1}$) del carbono almacenado cada año por la vegetación costera (Nelleman *et al.*, 2009).

El principal sumidero de carbono asociado a *Posidonia oceanica*, lo constituye el carbono orgánico sepultado en sus sedimentos. Esta especie presenta una producción primaria elevada (45 a $542 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, en Mateo *et al.*, 2006), de la que un 30 % se estima corresponde a órganos subterráneos (rizomas y raíces; Pergent *et al.*, 1994).



La mata de *Posidonia oceanica* constituye una acumulación masiva de materia orgánica muy resistente a la descomposición (secuestro de carbono).

The mat formed by *Posidonia oceanica* contains a very important accumulation of organic matter with a low rate of decomposition (carbon sequestration).

In the case of *Posidonia oceanica*, it is usually possible to identify (i) a short-term organic carbon sink (mineralization occurring between 2 and 6 years) and (ii) a longer-term sink (a few decades to several millennia). The proportion of carbon that joins the sinks over the long term (sequestration) is estimated at 10 to 25% of the total carbon fixed by the plant, which represents 0.15 to 8.75 10^6 tC a^{-1} on the scale of the Mediterranean, i.e. 0.5 to 20% of the carbon sequestered by all the seagrasses present in the oceans.

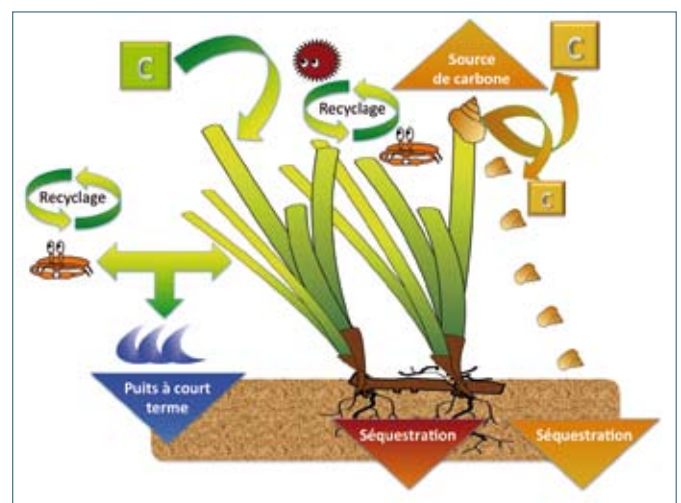
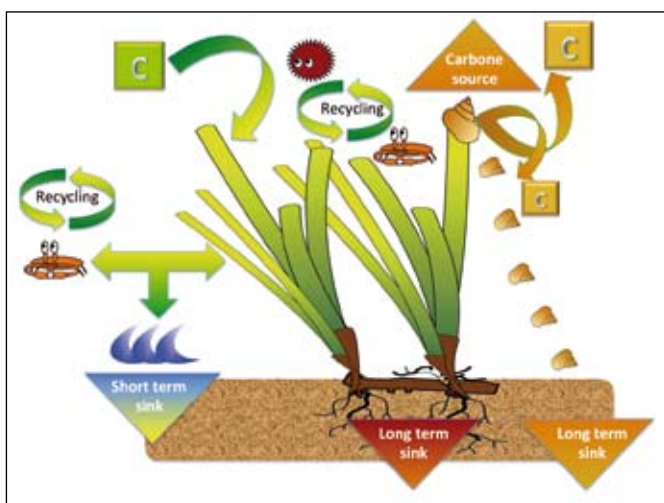
Taking the average thickness of the mat into account (1 to 4 m), the organic carbon stored is estimated to be between 100 and 410 10^3 gC m^{-2} (Romero *et al.*, 1994; Mateo *et al.*, 2010; Serrano, 2011). This represents 2.5 to 20.5 10^9 tC on the scale of the Mediterranean, i.e. 11 to 89% of CO_2 emissions produced by Mediterranean countries, through combustion of fossil hydrocarbons, since the beginning of the industrial revolution (23 10^9 tC in CDIAC, 2010). On the market for carbon, this quantity sequestered by *Posidonia oceanica* meadows is evaluated at 3 to 45 $\text{€ } m^{-2}$, i.e. 17 to 250 times more than tropical forests (MacCord & Mateo, 2010).

The ecosystem formed by *Posidonia oceanica* hosts an important community of calcareous organisms (Rhodobionta and "invertebrates"). Little data exists on the deposit of carbonated sediments from these organisms (Serrano *et al.*, 2011). The limited data available gives values comparable to those documented for coral ecosystems. While the building of the mat leads to significant carbon storage, calcification mechanisms provide the atmosphere, on the other hand, with a significant source of CO_2 (Smith & Gattuso, 2009). The ratio between CO_2 emitted and CO_2 fixed is estimated at 0.6 (Ware *et al.*, 1992). Applied to *Posidonia oceanica* seagrass, calcareous organisms would seem to generate an emission of 28 to 83 gC $m^{-2} a^{-1}$, i.e. a value somewhere between 0.7 y 4.2 10^6 tC a^{-1} on the scale of the Mediterranean.

En *Posidonia oceanica* se puede hablar de (i) un sumidero de carbono orgánico a corto plazo (la mineralización tiene lugar entre 2 y 6 años) y (ii) un sumidero a más largo plazo (con tiempos de residencia del orden de milenios). Se estima que la parte del carbono que alcance los sumideros a largo plazo (secuestro) representa entre el 10 y el 25 % del carbono total fijado por la planta, lo que representa de 0.15 a 8.75 10^6 tC a^{-1} a escala del Mediterráneo, es decir del 0.5 al 20 % del carbono secuestrado por el conjunto de las praderas formadas por todas las especies de Magnoliófitas presentes en los océanos.

Suponiendo un espesor medio de los sedimentos bajo *Posidonia oceanica* de entre 1 y 4 m, se estima que el carbono orgánico almacenado está entre 100 y 410 10^3 gC m^{-2} (Romero *et al.*, 1994; Mateo *et al.*, 2010 ; Serrano, 2011). Esto representa de 2.5 a 20.5 10^9 tC a escala del Mediterráneo, es decir del 11 al 89 % de las emisiones de CO_2 producidas, mediante combustión de hidrocarburos fósiles, por los países mediterráneos desde el inicio de la revolución industrial (23 10^9 tC in CDIAC, 2010). Según la cotización actual (2011) en el mercado de carbono se estima que la cantidad secuestrada por las praderas de *Posidonia oceanica* valdría entre 3 y 45 $\text{€ } m^{-2}$, es decir entre 17 y 250 veces más que los bosques tropicales (MacCord & Mateo, 2010).

El ecosistema formado por *Posidonia oceanica* alberga una comunidad considerable de organismos calcáreos (Rodobiontes e "invertebrados"). Existen pocos datos sobre las tasas de deposición de carbonatos provenientes de dichos organismos (Serrano *et al.*, 2011). Los pocos datos disponibles indican valores inferiores pero comparables a las tasas medidas en arrecifes de coral. Mientras que la acumulación orgánica en los sedimentos de *Posidonia oceanica* constituye un almacenamiento importante de carbono, los procesos de calcificación constituirían una fuente significativa de CO_2 para la atmósfera. Por cada gramo de carbono que precipita en forma de carbonatos en la pradera, 0,6 g netos son emitidos (regla del 0,6; Ware *et al.*, 1992). En las praderas de *Posidonia oceanica*, la calcificación sería responsables de la emisión de 28 a 83 gC $m^{-2} a^{-1}$, es decir un valor comprendido entre 0.7 y 4.2 10^6 tC a^{-1} a escala del Mediterráneo.



Sumideros y fuentes de carbono en asociados a las praderas de *Posidonia oceanica*.
Sinks and sources of carbon in *Posidonia oceanica* meadows.

CO₂ EMISSIONS OFFSET BY *POSIDONIA OCEANICA* IN THE BALEARIC ISLANDS

Just like terrestrial forests, *Posidonia oceanica* seagrass meadows can fix and bury a significant proportion of atmospheric CO₂, helping to reduce greenhouse gases and thus contributing towards regulation of the planet's climate. The Balearic Islands in the Mediterranean Sea are surrounded by extensive and very healthy *Posidonia oceanica* meadows. Although there are many areas around the Islands where the meadows have not been mapped or where the information available is limited, the total area covered by *Posidonia oceanica* is estimated at around 67,000 hectares. Comparing this area with the exceptionally high carbon accretion rates in their long-term sink, the global accretion rate is estimated at 0.23 10⁶ tC a⁻¹. This value equals 0.84 10⁶ tCO₂ a⁻¹. When compared to the Islands' global CO₂ emissions, it can be estimated that *P. oceanica* meadows surrounding the Balearic Islands offset 8.7% of these emissions. The total stock accumulated equals 105 years of the Islands' CO₂ emissions. The store of carbon sequestered beneath the meadows (mats) is estimated at 420 10³ gC m⁻², which corresponds, for each kilometre of coast line, to an accumulation five times higher than the average recorded for the Mediterranean. On the global carbon market, this stock is valued at 4 billion euros, i.e. around 6 € m⁻². These estimates confirm the outstanding role of *Posidonia oceanica* in the Balearic Islands as a carbon sink, and their uniqueness within the context of the Mediterranean.

Adapted from MacCord & Mateo (2010).

COMPENSACIÓN DE LAS EMISIONES DE CO₂ EN LAS ISLAS BALEARES POR EL SUMIDERO ASOCIADO A *POSIDONIA OCEANICA*

Al igual que los bosques terrestres, las praderas de *Posidonia oceanica* pueden fijar y sepultar una parte significativa del CO₂ atmosférico favoreciendo la reducción de este gas de efecto invernadero y contribuyendo así a la regulación del clima del planeta. Las islas Baleares, en el mar Mediterráneo, están rodeadas de praderas de *P. oceanica* muy extensas y gran exuberancia y vitalidad. Aunque existen muchos sectores en torno a las islas donde las praderas no han sido cartografiadas y donde las informaciones disponibles son escasas, se estima que la superficie total cubierta por *P. oceanica* alcanza casi 67.000 ha. Combinando dichas superficies y la tasa de acumulación de carbono a largo plazo, se estima que la captura global para las Baleares alcanzaría las 0.23 10⁶ tC a⁻¹, es decir 0.84 10⁶ tCO₂ a⁻¹. Comparando esta tasa de captura con las emisiones de CO₂ de las islas, se estima que las praderas de *P. oceanica* que las rodean rodean enterrarían el 8.7 % de dichas emisiones. La totalidad del almacenamiento acumulado equivaldría a 105 años de emisiones de CO₂ de las islas. El almacenamiento de carbono secuestrado bajo las praderas se estima en 420 10³ gC m⁻², lo que corresponde a una acumulación cinco veces más importante por cada kilometro de costa que la media registrada para las costas del mar Mediterráneo. En el mercado global de carbono, el valor de dichos stocks rondarían los 4 mil millones de euros, es decir unos 6 € m⁻². Estas evaluaciones confirman el papel excepcional de la *P. oceanica* en las islas Baleares como sumideros de carbono y su carácter único en el contexto mediterráneo.

Adaptado de MacCord & Mateo, 2010.

Taking sinks of organic carbon into account (sequestration; estimated maximum 8.75 10⁶ tC a⁻¹ and sources of non-organic carbon (calcification; estimated maximum 4.2 10⁶ tC a⁻¹), *Posidonia oceanica* meadows seem to constitute a major sink of CO₂ in the Mediterranean. Caution should, however, be exercised, as the values currently at our disposal are preliminary and deserve to be refined.

Tomando en cuenta los sumideros de carbono orgánico (secuestro; máximo estimado 8.75 10⁶ tC a⁻¹) y las fuentes de carbono inorgánico (calcificación; máximo estimado 4.2 10⁶ tC a⁻¹), las praderas de *Posidonia oceanica* se perfilan como sumideros significativos de CO₂ a escala del Mediterráneo. Las estimas presentadas deben ser consideradas como puntos de partida, pero son susceptibles de importantes variaciones a medida que se disponga de un mayor número de datos y se refinen los marcos conceptuales sobre sumideros de carbono en praderas marinas.

	Mediterranean Flow	
	gC m ⁻² a ⁻¹	10 ⁶ tC a ⁻¹
Sink of organic C (sequestration)	6 to 175	0.15 to 8.75
Source from calcification (emission)	28 to 83	0.7 to 4.2
Balance	-147 to +77	-8.1 to +4.1

Table 1:

Estimates of the carbon sink and source associated to *Posidonia oceanica* meadows (estimated by Mateo and Serrano for this report. Full information is given in the extended version).

	Flujo mediterráneo	
	gC m ⁻² a ⁻¹	10 ⁶ tC a ⁻¹
Sumidero orgánico de C (secuestro)	6 a 175	0.15 a 8.75
Fuente de C por deposición de carbonatos (emisión)	28 a 83	0.7 a 4.2
Balance	-147 a +77	-8.1 a +4.1

Tabla 1:

El sumidero y la fuente de carbono asociadas a *Posidonia oceanica* (Estimas realizadas por Mateo y Serrano para este informe. Ver detalles en la versión completa del mismo).

Conclusion

Mediterranean seagrass meadows reflect the history and biogeographical diversity of this particular sea. The many human pressures brought to bear on it today are likely to cause significant disruptions in the distribution and sustainability of these habitats.

Among these disruptions, climate change could lead to a general warming of the Mediterranean, with "meridionalization" or even "tropicalization" depending on the sectors, and to increasing frequency of extreme weather events. The rise in the average temperature of the sea water and its acidification (via dissolution of CO₂) would not be without consequence, both for the five species of marine Magnoliophyta present, and for the species associated with them.

Posidonia oceanica, the species most emblematic of the Mediterranean, exhibits relatively strong resilience to temperature, and the few regressions recorded seem to be related to weather events (thermal anomalies), either extreme or restricted to regions where summer temperatures are already very high. On the other hand, *Zostera noltii* and especially *Zostera marina* seem to be much more sensitive to the rise in sea water temperature, and for this last species several regressions have already been documented over the past few decades. In contrast, *Cymodocea nodosa*, a warm affinity species, and *Halophila stipulacea*, a Lessepsian species introduced into the Mediterranean in the late 19th century, seem rather to benefit from the warming of the Mediterranean.

The ecological characteristics of seagrasses found in the Mediterranean enable them to cover a broad spectrum of abiotic conditions, and when environmental conditions become unfavorable for one species, it can be replaced by another. However, while this replacement can occur with "indigenous" species, it can also be favorable to more opportunistic "introduced" species, or species with weaker structuring capacities, likely to cause deep changes in the communities.

The replacement of meadows composed of species of average or high structural complexity (*Zostera marina* and *Posidonia oceanica*) by meadows composed of warm affinity species but with lower structural complexity (*Cymodocea nodosa* and *Halophila*

Conclusión

Las praderas de Magnoliófitas marinas del Mediterráneo reflejan la diversidad biogeográfica y la historia de este mar. Es de esperar que las múltiples presiones derivadas de la actividad humana actual puedan dar lugar a alteraciones significativas en la distribución y la prevalencia de estas poblaciones.

Entre dichas alteraciones, el calentamiento general del Mediterráneo asociado al cambio climático podrían llevar a una "meridionalización" o incluso a una "tropicalización" (según las regiones), y a un aumento de la frecuencia de los episodios extremos. El aumento de la temperatura media de las aguas y su acidificación (por disolución del CO₂) no dejará de tener consecuencias para las cinco especies Magnoliófitas marinas presentes en el Mediterráneo ni para sus especies y comunidades asociadas.

Posidonia oceanica, la especie más emblemática del Mediterráneo, parece ser bastante resiliente a cambios en la temperatura. Las varias regresiones observadas hasta la fecha parecen ser fruto de episodios extremos (anomalías térmicas) o restringidas a regiones donde las temperaturas estivales son ya de hecho muy elevadas. En cambio, *Zostera noltii* y sobre todo *Zostera marina* parecen mucho más sensibles al aumento de la temperatura de las aguas, y para esta última especie ya se han descrito varios fenómenos de regresión durante las últimas décadas. A la inversa, *Cymodocea nodosa*, especie con afinidad por aguas cálidas, y *Halophila stipulacea*, especie lessepsiana introducida en el Mediterráneo a finales del siglo XIX, parecen más bien beneficiarse del calentamiento del Mediterráneo.

Las características ecológicas de las Magnoliófitas marinas presentes en el Mediterráneo les permiten cubrir un amplio espectro de condiciones abióticas y cuando las condiciones del medio son desfavorables para una especie, ésta puede ser sustituida por otra. Sin embargo, si esa sustitución puede existir con especies "indígenas", puede también favorecer especies "introducidas", más oportunistas, o especies que presentan unas capacidades estructurales más débiles que podrían acarrear cambios profundos en las comunidades.

stipulacea) would therefore have an effect on the diversity and role of the ecosystems associated with them. Furthermore, the rise in the temperature of the surface water of the Mediterranean leads to modification of the relative abundance of closely related species, to the benefit of those with the most "meridional" affinities, and favors the naturalization of alien species, particularly those originating from the Red Sea. This acceleration of the colonization process of the Mediterranean by Lessepsian species, which seems to be positively correlated with the warming of the waters, carries the risk of significant alteration of the functioning of Magnoliophyta meadows.

Among their many functions, seagrasses play a part in mitigating swells and waves, and protecting the shore from erosion. Thus, accumulation of *Posidonia oceanica* drift debris ("banquette") on the beaches provides very effective protection against erosion of the coast. The replacement of high biomass species (*Zostera marina* and *Posidonia oceanica*), of cold or temperate affinity, by smaller, warmer affinity species (*Cymodocea nodosa* and *Halophila stipulacea*) could lower the capacity for protection of the shore.

Like mangroves and salt marshes, seagrasses play a major role in the fixation and sequestration of blue carbon. In the case of *Posidonia oceanica*, primary production is estimated at between 45 and 542 gC m⁻² a⁻¹, and a significant proportion of fixed organic carbon (10 to 25%) is sequestered within the sediment (matte), constituting a long-term carbon sink (a few decades to several millennia). Inversely, the calcification mechanisms of certain Rhodobionta and "invertebrates" provide the atmosphere with a significant source of CO₂.

In *Posidonia oceanica* meadows, calcareous organisms produce emissions of 28 to 83 gC m⁻² a⁻¹. Even though caution should still be exercised when looking at values currently available, the observation of organic carbon sinks (sequestration) and sources of non-organic carbon (calcification) seems to indicate that *Posidonia oceanica* meadows could be a major sink of CO₂. On the scale of the Mediterranean, the average quantity of fixed carbon could be in the region of eight millions tons per year.

Over and beyond these values, it seems evident that the essential interest of *Posidonia oceanica* seagrass lies in the accumulation, over long periods of time, of considerable quantities of carbon within the matte. Efforts should therefore focus primarily on conservation of these reservoirs to avoid the carbon they contain being released into circulation.

Así, la sustitución de praderas de especies con una complejidad estructural media o fuerte (*Zostera marina* y *Posidonia oceanica*) por praderas de especies con afinidad por aguas cálidas pero con una complejidad estructural menor (*Cymodocea nodosa* y *Halophila stipulacea*) conllevaría consecuencias sobre la diversidad y el papel de los ecosistemas asociados a éstas. Por otra parte, el aumento de la temperatura superficial del agua del Mediterráneo genera una modificación sobre la abundancia de las especies vecinas, a favor de aquellas que tienen una afinidad más meridional, y favorece la naturalización de especies exóticas, especialmente las que son originarias del mar Rojo. Debido a esta aceleración del proceso de colonización del Mediterráneo por especies lessepsianas, que parece estar relacionada positivamente con el calentamiento global de sus aguas, se corre el riesgo de que tengan lugar cambios significativos en el funcionamiento de las praderas de Magnoliófitas.

Entre sus numerosas funciones, las praderas desempeñan un papel en la amortiguación del mar de fondo y las olas y en la protección del litoral contra la erosión. De ese modo, la acumulación de los residuos de *Posidonia oceanica* (bancales) sobre las playas ofrece una protección muy eficaz contra la erosión del litoral. La sustitución de las especies que presentan abundante biomasa (*Zostera marina* y *Posidonia oceanica*), con afinidad por aguas frías o templadas, por especies más pequeñas, con afinidad por aguas más cálidas (*Cymodocea nodosa* y *Halophila stipulacea*) podría reducir la capacidad de protección del litoral.

A semejanza de los manglares y de las marismas, las Magnoliófitas marinas desempeñan un papel esencial en la fijación y el secuestro del llamado carbono azul. La producción primaria de *Posidonia oceanica* se estima entre 45 y 542 gC m⁻² a⁻¹. Una parte considerable de este carbono orgánico fijado (10 a 25 %) es sepultado en el sedimento (mata) formando un sumidero de carbono de elevado tiempo de residencia (llegando a alcanzar varios milenios). Inversamente, los procesos de precipitación de carbonatos (químicos y biológicos), favorecidos por el pH elevado en las praderas, podrían constituir una fuente significativa de CO₂ para la atmósfera.

En las praderas de *Posidonia oceanica*, la precipitación de carbonatos podría ser responsable de la emisión de entre 28 y 83 gC m⁻² a⁻¹. Si bien conviene llamar a la prudencia ante estas estimas preliminares, el balance resultante entre el secuestro de carbono orgánico y las emisiones derivadas de la precipitación de carbonatos, parecen indicar que las praderas de *Posidonia oceanica* serían sumideros significativos de CO₂. A escala del Mediterráneo, la cantidad media del carbono fijado sería de hasta ocho millones de toneladas por año.

Si bien se ha visto que el papel de *Posidonia oceanica* como sumidero de carbono (tasa de secuestro anual) es significativo, de las estimas presentadas se desprende que el verdadero interés de *Posidonia oceanica* en el ciclo global del carbono reside en el gran stock de carbono acumulado durante miles de años. Los esfuerzos deberían pues centrarse de forma prioritaria en la conservación de estos depósitos para evitar un eventual retorno a la atmósfera del carbono que contienen.