

ANÁLISIS DEL CICLO DE CARBONO EN EMBALSES Y SU POSIBLE EFECTO EN EL CAMBIO CLIMÁTICO. APLICACIÓN AL EMBALSE DE SUSQUEDA (RÍO TER, NE ESPAÑA)

Antoni Palau

Dirección de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Endesa
Crta. Tarragona, Km 89,300. 25001-Magraners (Lleida)
Antonio.palau@endesa.es

Miguel Alonso

United Research Services España, S.L.
C/ Comte d'Urgell, 155, 08036 Barcelona

David Corregidor

Dirección de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Endesa
C/ Ribera de Loira, 60, 28042 Madrid.

Resumen: Los embalses han sido considerados como sistemas emisores netos de carbono. Si bien es cierto que son sistemas forzados a descomponer toda la materia orgánica que queda cubierta por el agua tras la puesta en carga, esta fase inicial de maduración, remite con los años hasta niveles de emisión de carbono similares a las de lagos de estado trófico equivalente. No todos los embalses tienen un comportamiento similar en el procesamiento de la materia orgánica carbonatada.

El balance de carbono de un embalse no puede obviar la fracción de este elemento que queda retenido en los sedimentos. En el presente artículo se presenta el balance de carbono del embalse de Susqueda (río Ter; NE España). Sus emisiones a la atmósfera representan menos del 0,3 % del balance y son más de 7 veces menores que la cantidad de carbono retenido en el sedimento ($665 \text{ g C m}^{-2} \text{ año}^{-1}$).

La cantidad de carbono neta que retiene el embalse ($1.599 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) es algo superior a la que podría retener la vegetación mediterránea del ecosistema terrestre original que fue inundado con la construcción del embalse ($804\text{--}1.406 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$). La mayor parte del carbono que interviene en el balance procede de su cuenca tributaria.

Al analizar la contribución de los embalses al cambio climático no puede obviarse que todo el carbono que interviene en el balance es "actual;" es decir, carbono recientemente fijado y por tanto no supone un incremento cuantitativo neto de los gases invernadero en la atmósfera.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, se ha debatido con cierta profusión e intensidad, la posible contribución de los embalses al cambio climático a través de la emisión de gases de efecto invernadero, procedentes de procesos de respiración aeróbica o anaeróbica, en el interior de la masa de agua y los sedimentos (Tremblay *et al.*, 2005). Actualmente, al debate se le ha añadido también un creciente interés en conocer los efectos del cambio climático sobre los embalses (Marcé *et al.*,

2009).

La IHA (International Hydropower Association) ha cuantificado que el efecto sumidero de los embalses es de un 2,5 % de las emisiones globales de CO_2 , sin embargo, desde entidades conservacionistas como la IRN (International Rivers Network) se predica exactamente lo contrario, aduciendo que los embalses pueden emitir hasta casi dos veces más carbono del que puedan retener en los sedimentos, añadiendo además otros efectos colaterales como la interferencia en el flujo de carbono y nutrientes al mar, lo que limi-

taría la capacidad de fijación de carbono en los océanos, o la puesta en circulación de carbono que representa las sueltas de sedimentos desde los embalses (Parekh, 2004).

Los embalses, por tanto, lo tienen complicado: mal si emiten CO_2 y CH_4 , mal si retienen carbono en sus sedimentos impidiendo que llegue al mar y mal si liberan carbono cuando sueltan sedimentos, aunque ello sea a la par reivindicado para evitar regresiones deltaicas. En todo caso, toda la bibliografía consultada es unánime en una cuestión: los embalses retienen carbono en sus sedimentos.

En este artículo se presenta, en primer lugar, el ciclo del carbono en los ecosistemas acuáticos, indicando cuales son los principales compartimentos y procesos implicados. A continuación se analiza como los embalses pueden intervenir en el cambio climático. Se dan datos de emisiones de distintos tipos de los ecosistemas terrestres que pueden ser inundados con la construcción de presas, así como de distintos tipos geográficos de embalses (boreales, templados, tropicales) y se muestra la importancia que tiene el proceso de maduración de los embalses en la emisión de gases de efecto invernadero. Como no todos los embalses procesan la materia orgánica de la misma forma, se indican también los aspectos que intervienen en su balance de carbono.

Finalmente se presenta un caso estudiado: el embalse de Susqueda, situado en el río Ter (NE, España) y que por su carácter meso-eutrófico, puede considerarse representativo de un buen número de embalses españoles. Se presenta su balance de carbono, el modelo adoptado para cuantificarlo, las hipótesis de trabajo planteadas, los resultados y unas sencillas conclusiones. Todos los datos, las tablas y las figuras que aparecen en este artículo se han extraído de Palau y Alonso, (2008).

EL CARBONO EN LOS SISTEMAS ACUÁTICOS

El carbono es el elemento en torno al cual se organiza la vida en La Tierra. Todas las formas de vida conocidas son estructuras más o menos complejas de carbono elemental y de compuestos de carbono.

Las principales reservas de carbono en la Tierra se encuentran en el CO_2 atmosférico, en los fondos marinos y en los depósitos geológicos minerales (rocas carbonatadas y combustibles fósiles). En condiciones naturales, la actividad fotosintética y la respiración gobiernan el equilibrio de carbono en la Tierra, con la participación, en

el caso de los ecosistemas acuáticos, de los procesos de precipitación química de compuestos carbonatados.

El problema del cambio climático debido al aumento de la concentración de gases con efecto invernadero en la atmósfera es, en esencia, una cuestión de alteración de la velocidad del ciclo del carbono. En condiciones naturales, una pequeña fracción del carbono se va acumulando en el fondo de mares y océanos, que actúan como grandes sumideros de carbono a escala planetaria, en forma de materiales carbonatados y carbono orgánico fósil. En estos depósitos el carbono acumulado queda fuera del ciclo por espacio de 10^4 - 10^6 años, hasta que por procesos tectónicos o de vulcanismo, vuelve a ser expuesto a la atmósfera y se mineraliza dando CO_2 que cierra su ciclo. Lo que la naturaleza hace en 10^4 - 10^6 años, el hombre lo lleva a cabo, mediante la extracción y aprovechamiento energético de recursos fósiles, en 10^1 - 10^2 años, de manera que inyecta en la atmósfera, en un reducido espacio de tiempo, una mayor cantidad de carbono que la que correspondería en la escala de tiempo natural.

Los ecosistemas acuáticos, a gran escala en el caso de mares y océanos y a una escala muy modesta los ecosistemas acuáticos epicontinentales, tienen todos los mecanismos para actuar como sumideros de carbono. De hecho, esa es una de sus principales funciones dentro del ciclo del carbono, que ningún otro ecosistema puede hacer con una eficacia comparable.

La posible contribución de los embalses al cambio climático viene a través de sus emisiones de dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4), que junto con los compuestos que forman parte del sistema carbónico-carbonatos ($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$) son las formas químicas inorgánicas más importantes del carbono en los ecosistemas acuáticos (Figura 1).

De forma simple, el CO_2 está asociado a las actividades de fotosíntesis, respiración y junto con el calcio, está integrado en el sistema carbónico-carbonatos, que juega un papel clave en la estabilización del pH del agua en los ecosistemas acuáticos epicontinentales. El metano por su parte, proviene de la descomposición anaeróbica de la materia orgánica. En cuanto a los compartimentos implicados en el ciclo del carbono de un ecosistema acuático, son básicamente cuatro: la atmósfera, la masa de agua, los sedimentos y los seres vivos.

Es importante destacar que en los ecosistemas acuáticos existe un importante aporte de

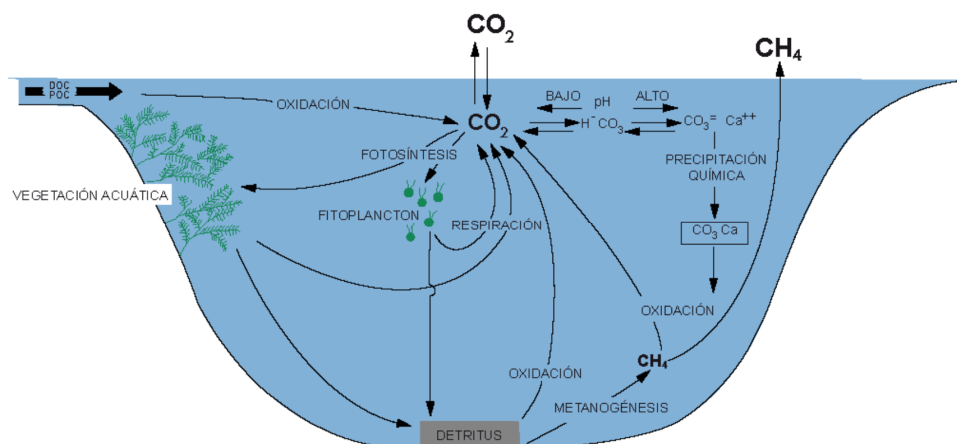


Figura 1. Principales procesos y compartimentos implicados en el ciclo del carbono, en los ecosistemas acuáticos epicontinentales (Palau y Alonso, 2008)

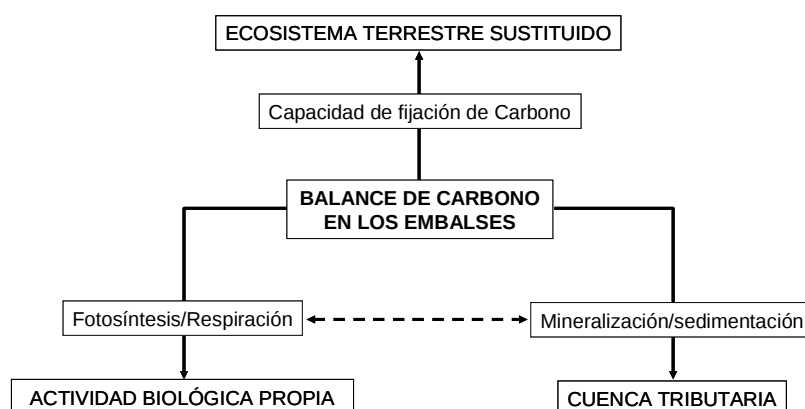


Figura 2. Tríada de aspectos que hay que tener en cuenta en el planteamiento de un balance de carbono para un embalse

carbono orgánico e inorgánico, bien sea disuelto o particulado, asociado al propio flujo de agua circulante. En los embalses, al estar intercalados en ríos, en cuencas a menudo pobladas y con tiempos de residencia del agua en su interior más bien pequeños (meses a lo sumo en la gran mayoría de casos), este aporte es aún más importante, si cabe que para los lagos, pudiendo representar la mayoría del carbono que el embalse tendrá que procesar.

LOS BALANCES DE CARBONO EN LOS EMBALSES

Aspectos generales

Como ya se ha indicado, lo habitual es que la contribución de los embalses al cambio climático se mida sólo a partir de la cantidad de gases con efecto invernadero (CO_2 , CH_4) que emiten a la atmósfera. Sin embargo, un balance com-

pleto (Figura 2) debe tener también en cuenta la cantidad de carbono que queda retenida en los sedimentos, en forma de materia orgánica o inorgánica procesada por el embalse, mayoritariamente aportada por sus tributarios.

Además, para interpretar correctamente la contribución de un embalse al cambio climático hay que tener en consideración también, cuál es el balance de carbono del ecosistema terrestre al que sustituyeron, por inundación, tras la construcción de la presa. La Tabla 1 muestra las tasas de fijación de carbono en forma de CO_2 , para distintos tipos de cubierta vegetal propios de ambientes ibéricos. Los valores se deducen de Gracia *et al.*, (2010) y de Gracia (comunicación personal). En la zona NE de España donde se localiza el embalse de Susqueda, cuyo balance de carbono se presenta más adelante, la vegetación más común sería la de matorral y bosque mediterráneo.

Tipo de comunidad	Tasa de fijación media de CO ₂	
	(mg CO ₂ m ⁻² día ⁻¹)	(g C m ⁻² año ⁻¹)
Estepa árida	502	50
Campos de cultivo de secano	804 – 1.205	80 -120
Campos de cultivo de regadío	1.004 – 1.406	100 -140
Matorral mediterráneo	804 – 1.004	80-100
Matorral húmedo	1.506	150
Bosque mediterráneo	1.406	140
Bosque húmedo	2.511	250

Tabla 1. Tasas de fijación media de CO₂ por diferentes tipos de comunidades vegetales terrestres (Gracia *et al.*, 2010)

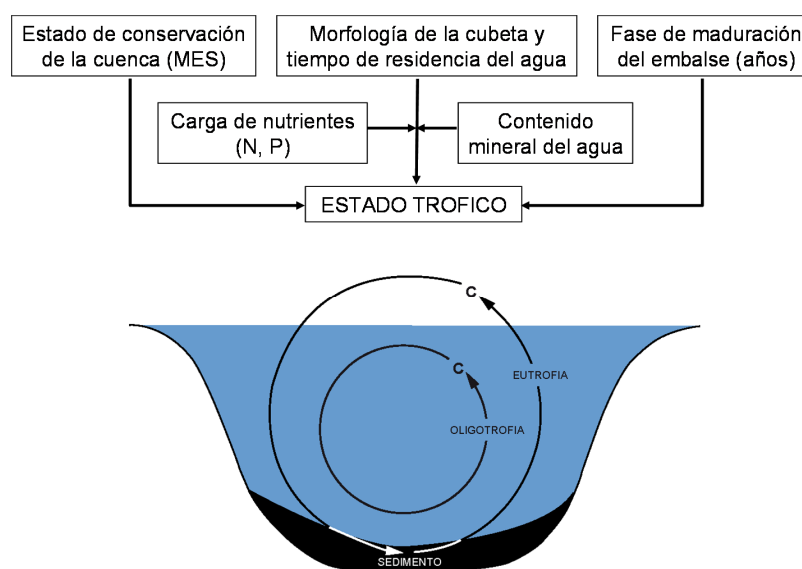


Figura 3. Principales aspectos que intervienen y condicionan el ciclo del carbono en un embalse, junto con una representación de las relaciones aire-agua-sedimento según el estado trófico de la masa de agua

Como se puede ver en la Tabla 1, el bosque mediterráneo está entre la vegetación que más carbono fija, solo inferior al bosque caducifolio húmedo. Es importante destacar que todas estas cifras se refieren al balance entre lo que la vegetación fija con la fotosíntesis y lo que emite con la respiración, pero no está contemplado todo el carbono emitido por toda la vida heterótrofa (animales, bacterias, hongos,) que habita en cada masa vegetal. De hecho, si se hicieran estimas globales que incluyeran tanto la parte autótrofa como la heterótrofa, al completo, se llegaría a conclusiones tan curiosas como que produce más oxígeno, y fija más CO₂, un campo agrícola abandonado que la selva tropical (Margalef, 1992).

En efecto, las tasas de fijación de CO₂ de los campos de cultivo (Tabla 1) son altas y por su simplicidad como ecosistemas y la dominancia de la autotrofia, deben estar mucho más próxi-

mas a las reales absolutas que las de las masas forestales, donde la vida heterótrofa tiene sin duda mucho más peso. Algunos estudios relativamente recientes (Megonigal y Guenther, 2008) apuntan que las emisiones de metano en suelos forestales, consideradas habitualmente bajas o despreciables, pueden no serlo tanto en determinadas condiciones.

Principales condicionantes

La Figura 3 muestra los principales aspectos intervinientes, que son a su vez condicionantes, en el balance de carbono de un embalse.

El estado trófico juega un papel importante, en la medida en que determina la cantidad de materia orgánica que el sistema debe procesar. A su vez, el estado trófico depende del estado de conservación de la cuenca y los usos del suelo, de la morfología de la cubeta y el tiempo de residencia del agua, del número de años trans-

curridos desde la primera inundación, así como de la carga de nutrientes (nitrógeno y fósforo) que recibe y del grado de mineralización de sus aguas, que le confiere una determinada capacidad de eliminar fósforo por precipitación con el calcio disuelto.

En general un sistema oligotrófico, es un sistema poco productivo y que funciona con un ciclo del carbono muy cerrado, sin apenas intercambios entre agua, atmósfera y sedimentos, mientras que en sistemas eutróficos, muy productivos, el sistema tiende a externalizar los excedentes de carbono que le toca procesar, tanto hacia la atmósfera en forma de gases, como hacia los sedimentos en forma de materia orgánica

e inorgánica carbonatada (Margalef, 1976).

Dinámica del carbono en los embalses

La Figura 4 muestra el funcionamiento de un embalse típico de las zonas templada o boreal, en sus primeros años tras el cierre de la presa y la primera inundación, y a partir de los 10 años de puesta en explotación. En dicha Figura 4 sólo se representa el intercambio gaseoso aire-agua.

En los primeros años de inundación, dentro de lo que se conoce como proceso de maduración del embalse y que viene a durar por término medio entre 5 y 8 años, toda la materia orgánica

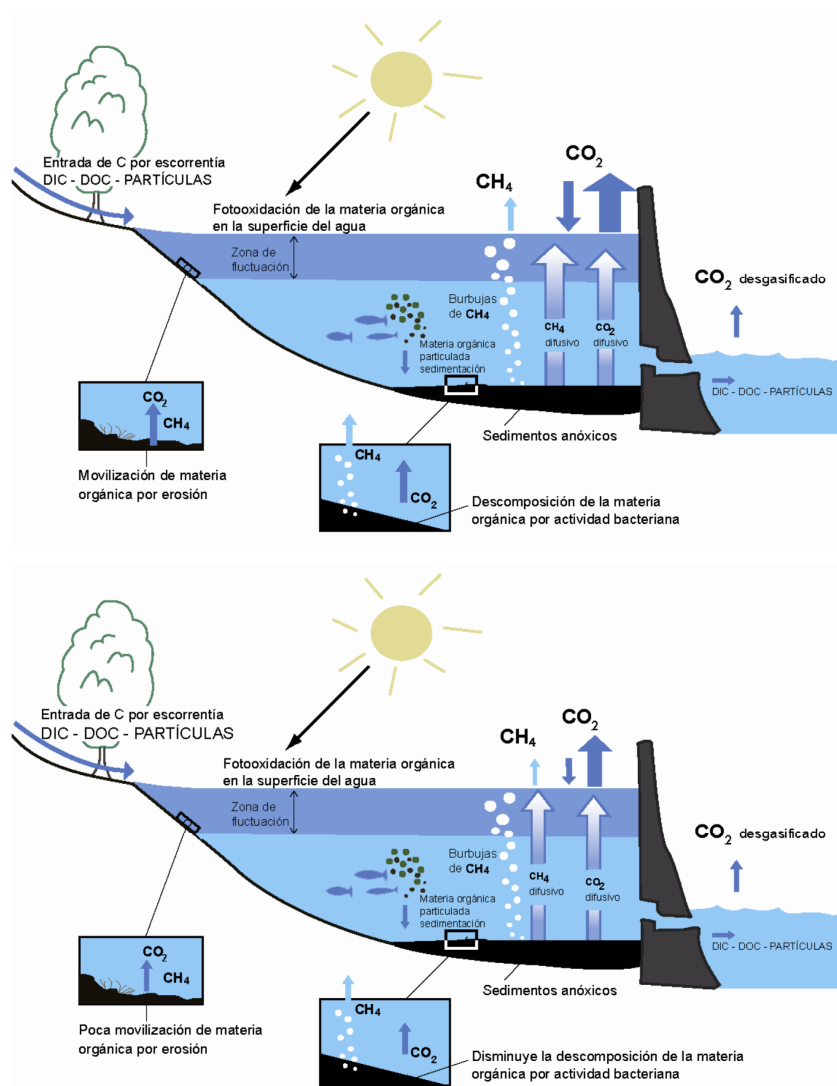


Figura 4. Emisiones de gases con efecto invernadero en embalses templados y boreales, según los años transcurridos desde la primera inundación. En la imagen superior se muestra el proceso para un embalse nuevo (< 10 años de puesta en explotación) y en la inferior para un embalse con el proceso de maduración superado (Palau y Alonso, 2008)

que queda bajo el agua tras la primera inundación, debe descomponerse, con o sin oxígeno según las condiciones del medio, lo que puede provocar emisiones importantes de CO_2 y CH_4 al principio.

También el lavado de los suelos en la zona de oscilación de nivel de agua, incorpora materia orgánica a los procesos de producción de CO_2 y CH_4 , así como todo el carbono orgánico e inorgánico que el embalse fija a través de la producción primaria o que recibe de su cuenca tributaria.

Con el paso del tiempo (> 10 años), la concentración de materia orgánica oxidable en los sedimentos se va agotando y con ella se van reduciendo las emisiones de CO_2 y CH_4 . Al final, estas emisiones pueden ser similares a las de lagos comparables; es decir, lagos de un estado trófico parecido. Así, las emisiones promedio para un conjunto de lagos y embalses boreales y templados, de Canadá y del suroeste de Estados Unidos (Duchemin *et al.*, 1999; Tremblay *et al.*, 2005) son de $1.130 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ para los embalses y de $1.150 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ para los lagos.

En el caso de los embalses tropicales, la situación es funcionalmente distinta. Las emisiones iniciales son muy superiores, con un predominio claro del CH_4 frente al CO_2 debido a la gran cantidad de materia orgánica presente, la mayor temperatura del agua y, sobre todo, la permanente estratificación de la columna de agua, que determinan la formación de una capa anóxica persistente en profundidad.

Con el tiempo, las emisiones de CO_2 y CH_4 de los embalses tropicales también se atenúan, pero pueden mantenerse altas durante muchos más años que los boreales y templados, por la persistencia de la capa de agua anóxica y por la gran cantidad de materia orgánica que reciben con las aguas entrantes. Algunos datos disponibles (Rosa *et al.*, 1997; 1999) indican que en embalses de Brasil la tasa de emisión de CO_2 es, en promedio, de unos $3.630 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$; unas tres veces superior a la de lagos y embalses boreales y templados.

CASO DE ESTUDIO: EL EMBALSE DE SUSQUEDA

Descripción general

A continuación se expone un caso concreto de

estudio: el del embalse de Susqueda, cuya presa es propiedad de Endesa y que se explota para el abastecimiento de agua de Barcelona y para la producción hidroeléctrica, junto con los embalses de Sau y Pasteral situados en cadena aguas arriba y aguas abajo respectivamente del de Susqueda.

El embalse se encuentra en el tramo medio del río Ter (NE, España). Se construyó en los años 60. Está situado a unos 350 m sobre el nivel del mar, en una zona de aguas mineralizadas. Tiene un volumen máximo de 233 hm^3 y una considerable profundidad a cota máxima (129 m). Es un embalse meso-eutrófico, con hipoxia permanente en las aguas de fondo y anoxia ocasionalmente, si bien durante el periodo de estudio no se registró anoxia y por tanto la producción de metano pudo considerarse despreciable.

Metodología

El balance de carbono para el embalse de Susqueda se planteó en base a la cuantificación de los siguientes cuatro apartados: las entradas (aguas entrantes, tanto del río principal como de los pequeños tributarios directos), las salidas (aguas que abandonan el embalse o las que incrementan el volumen de embalse), el intercambio aire-agua y el carbono acumulado en los sedimentos.

La toma de muestras se realizó siguiendo las técnicas de trabajo de campo habituales en este tipo de estudios limnológicos. Se midió la concentración de carbono en las entradas y salidas de agua, en la masa de agua embalsada y en el sedimento. Mediante trampas de sedimentación se cuantificó el carbono que llegó al sedimento. El almacenamiento de carbono en los sedimentos se estudió con técnicas radiométricas absolutas aplicadas a "cores" (testigos verticales de sedimento).

Por diferencia de concentración entre el carbono inorgánico del agua superficial y de la atmósfera, se estimó el intercambio de CO_2 aire-agua. Este método parece ser uno de los que menos sobreestima el intercambio, según estudios comparados, realizados con técnicas isotópicas precisas (Tremblay *et al.*, 2005). Para más detalles sobre los equipos, materiales y métodos adoptados, puede consultarse Palau y Alonso (2008).

En la Figura 5 se muestra, de forma esquemática, el modelo de "caja negra" planteado para el balance de carbono del embalse.

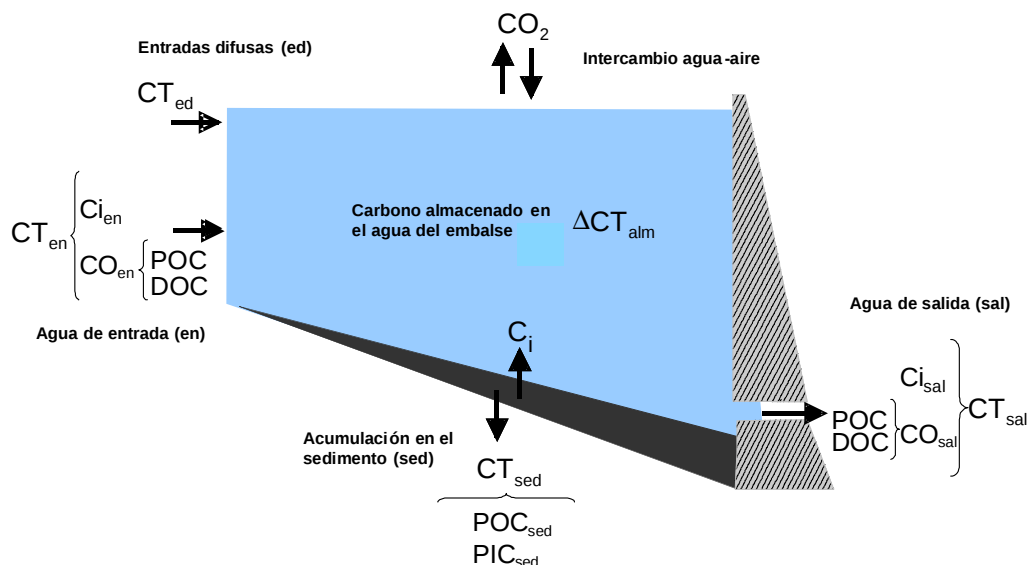


Figura 5. Esquema ilustrativo del modelo de caja negra adoptado para determinar el balance de carbono en el embalse de Susqueda. CT: carbono total; CO: carbono orgánico; CI: carbono inorgánico; POC: carbono orgánico particulado; DOC: carbono orgánico disuelto; PIC: carbono inorgánico particulado (Palau y Alonso, 2008)

Como hipótesis de trabajo para explicar el tipo de balance seguido por el carbono en el embalse, se plantearon los siguientes 5 supuestos:

- Un sistema heterótrofo (entradas ¿salidas; es decir, recibe más carbono del que produce o expulsa) y acumula carbono en el sedimento.
- Un sistema igualmente heterótrofo pero que pierde carbono acumulado en el sedimento.
- Un sistema autótrofo (entradas ¿salidas; es decir, produce o expulsa más carbono del que recibe) y acumula carbono en el sedimento.
- Un sistema también autótrofo pero que pierde carbono acumulado en el sedimento.
- Un sistema autótrofo estacionario, donde las entradas de carbono son iguales a las salidas. No acumula carbono en el sedimento ni tampoco tiene emisión neta a la atmósfera.

Resultados

La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos, junto con las condiciones hidrológicas y la duración del estudio del balance de carbono en el

embalse de Susqueda. El estudio se llevó a cabo durante casi un año (309 días). A partir de los flujos de agua y las concentraciones de carbono medidas, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Carbono total entrado al embalse con las aportaciones: 15.632,1 t C.
- Carbono total salido del embalse con las aguas salientes: 11.043,2 t C.
- Carbono total acumulado en el agua del embalse: 4.678,0 t C.
- Carbono total emitido a la atmósfera: 85,9 t C.
- Carbono total almacenado en el sedimento: 639,6 t C.

El balance de la masa de agua embalsada para los 309 días, fue de unas entradas de 15.632,1 t C y unas salidas de 16.446,7 t C.

CONCLUSIONES

A la vista de los resultados obtenidos, la primera conclusión es que no se puede generalizar sobre la consideración de que los embalses tienen una contribución neta al cambio climático, ni tampoco se puede afirmar que los embalses emiten más CO₂ que los lagos naturales equivalentes.

	Inicio	Final
Período del estudio	29 abril 2002	4 marzo 2003
Días transcurridos	309	
Volumen (hm ³)	86,45	215,12
Incremento de volumen (hm ³)	128,67	
	Entradas	Salidas
Volumen de agua del río Ter (hm ³)	376,46	305,73
Tributarios directos del embalse (hm ³)	57,94	
Carga de DIC en el agua del río Ter (t)	13.068,0	9.684,9
Carga de DOC en el agua del río Ter (t)	1.329,6	1.167,5
Carga de POC en el agua del río Ter (t)	185,8	190,9
Cargas de C total en el agua del río Ter (t)	14.583,4	11.043,2
Cargas de C total en el agua de los tributarios (t)	1.048,7	
C total incorporado en el agua del embalse (t)		4.678,0
Emisión de CO ₂ (t C)		85,9
POC incorporado en el sedimento (t)		507,9
PIC incorporado en el sedimento (t)		131,7
C total incorporado en el sedimento (t)		639,6

Tabla 2. Resultados del balance hidrológico y el balance de carbono para el embalse de Susqueda durante el periodo de estudio. DIC: carbono inorgánico disuelto; DOC: carbono orgánico disuelto; POC: carbono orgánico particulado; PIC: carbono inorgánico particulado

A la hora de analizar la contribución de los embalses al cambio climático y de acuerdo con lo apuntado por Palau y Prieto (2009), hay una consideración fundamental a tener en cuenta. Se trata de no obviar que todo el carbono que interviene en el balance de un embalse, es carbono “actual”, es decir, carbono recientemente fijado en su cuenca o en su propia masa de agua y por tanto no supone un incremento cuantitativo neto de los gases invernadero en la atmósfera, ni siquiera a una escala de tiempo humana.

La única posible contribución de los embalses al cambio climático sería porque una parte del CO₂ que fijan lo pueden retornar como CH₄ (metano), que tiene unas 20-23 veces más efecto invernadero que el CO₂, si se dan condiciones anóxicas importantes, persistentes y la columna de agua tiene poca profundidad, pero los embalses no “aumentan” la cantidad de carbono en la atmósfera porque no movilizan carbono fósil.

Probablemente habría que afinar en las técnicas de análisis de las emisiones de metano, pues la toma de muestras en superficie, de gases generados en el hipolimnion de los embalses, puede dar errores considerables. También hay que contemplar el diferencial real de emisión de metano de los embalses, con respecto a los ecosistemas terrestres que sustituyen, en los que, sin duda, podría y debería incluirse el derivado de prácticas antrópicas (ganadería en terrenos de pastos,...). En todo caso, como la mayor parte del carbono que entra en los embalses procede de la cuenca, lo más correcto sería plantear balances globales de carbono a nivel de cuenca, más que a nivel

de embalse aislado. Una parte muy importante del carbono fijado por los ecosistemas terrestres, es arrastrado hacia los cursos de agua, pudiendo acabar en embalses. De esta forma, los ecosistemas terrestres pueden mantener un balance positivo de carbono (fijación/emisión) a expensas de que una parte importante del carbono que fijan, es conducido a los ecosistemas acuáticos continentales, que se ven forzados a procesarla.

El balance de carbono del embalse de Susqueda muestra que las aguas entrantes y salientes representan más del 83 % del carbono manejado por el embalse. La emisión a la atmósfera no llega ni al 0,3 % del balance y es más de 7 veces menor que el carbono que queda retenido en el sedimento.

El embalse de Susqueda se comporta como un sistema autótrofo (entradas y salidas) que acumula carbono en el sedimento.

El sedimento actúa como un sumidero, capturando una cantidad de carbono que repartida en las 113,66 ha de la superficie de fondo del embalse supone 665 g C m⁻² año⁻¹. Esta cifra, convertida en materia orgánica seca procedente del seston representa unos 1.663 g C m⁻² año⁻¹, siendo muy superior al rango normal de sedimentación en lagos (entre 60 y 200 g C m⁻² año⁻¹).

Este hecho se explica por la mayor tasa de sedimentación de los embalses frente a los lagos, que permite que una cantidad de materia orgánica vaya quedando enterrada en el sedimento, sin posibilidad de retornar al agua. Una parte de materia orgánica queda adsorbida a carbonatos pre-

cipitados, mientras que otra va quedando acumulada en distintos estadios de descomposición (lípidos, carbohidratos, proteínas, aminoácidos, ácidos grasos, pigmentos)

En cuanto a la emisión de CO_2 a la atmósfera resultó ser muy inferior a los datos de lagos y embalses boreales y templados ya referidos en este artículo: $223 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ del embalse de Susqueda frente a los $1.130\text{--}1.150 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ año}^{-1}$, de embalses y lagos boreales y templados.

Finalmente, la cantidad de carbono neta que retiene el embalse es de $1.599 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ que resulta ser incluso algo superior a la que podría retener la vegetación mediterránea del ecosistema terrestre original que fue inundado con la construcción del embalse ($804\text{--}1.406 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ año}^{-1}$).

REFERENCIAS

- Duchemin, E., R. Canuel, P. Ferland y M. Lucotte, (1999). Étude sur la production et l'émission de gaz à effet de serre par les réservoirs hydroélectriques de l'entreprise et de lacs naturels (Volet 2). Université du Québec a Montreal, 47 pp.
- Gracia, C., S. Sabaté, J. Vayreda, T. Sebastià, R. Savé, M. Alonso y M. Vidal, (2010). Embornals. En Segon informe sobre el canvi climàtic a Catalunya, J.E. Llebot (Ed.), Generalitat de Catalunya, Institut d'Estudis Catalans, Barcelona, 135–182.
- Marcé, R., J. Armengol y J. Dolz, (2009). Els efectes als embassaments i la seva rellevància en la quantitat i la qualitat de l'aigua per la garantia del recurs. En Aigua i Canvi Climàtic. Agència Catalana de l'Aigua, Generalitat de Catalunya, 221–238.
- Margalef, R., (1976). Biología de los embalses. Investigación y Ciencia, 1, 50–62.
- Margalef, R., (1992). Planeta azul, planeta verde. Biblioteca Scientific American, Barcelona, 265 pp.
- Megonigal, J.P. y A.B. Guenther, (2008). Methane emissions from upland forest soils and vegetation. Tree Physiology, 28, 491–498.
- Palau, A. y M. Alonso, (2008). Embalses y cambio climático. Monografías de Endesa, Dirección de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, Endesa, Lleida, 47 pp.
- Palau, A. y C. Prieto, (2009). Hidroelectricidad, embalses y cambio climático. Ingeniería del Agua, 16(4), 311–324.
- Parekh, P., (2004). A Preliminary Review of the Impact of Dam Reservoirs on Carbon Cycling. International Rivers Network, Massachusetts, 8 pp.
- Rosa, L.P., B.M. Sikar, E.M. Sikar y M.A. Santos, (1997). A model for CH_4 and CO_2 emission mean life in reservoir base don data from Amazonian hydroplan. En Hydropower plants and greenhouse gas emissions, L.P. Rosa y M.A. Santos (Eds.), COPPE.
- Rosa, L.P., B. Matvienko, M.A. Santos y E.M. Sikar, (1999). Relatório Eletrobrás/Fundação Coppetec. Inventário das emissões de gases de efeito estufa derivadas de hidrelétricas, COPPE Report to Eletrobrás.
- Tremblay, A., L. Varfalvy, C. Roehm y M. Garneau, (2005). Greenhouse gas emissions: Fluxes and processes, hydroelectric reservoirs and natural environments. Environmental Science Series, Springer, New York, 732 pp.