

## Cambio climático: el papel de las algas verdes calcáreas y su relación con el carbono azul

\*Ileana Ortégón Aznar, Andrea Chuc Contreras, Armin Tuz Sulub y Jorge Santos Flores

Departamento de Biología Marina. Campus de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad Autónoma de Yucatán.

\*oaznar@correo.uady.mx

### Introducción

En los últimos 250 años han ocurrido cambios en el planeta, y uno de estos es el cambio climático provocado principalmente por el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) atmosférico que ha aumentado en casi un 40 %, pasando de los niveles preindustriales de unos 280 ppmv (partes por millón de volumen) a más de 400 ppmv (Bala 2013). Este aumento es derivado de la excesiva combustión de combustibles fósiles y la deforestación. Dentro de toda esta temática relacionada al cambio climático se han acuñando términos asociados a él. Actualmente hay una clasificación del carbono en cuatro tipologías: carbono “Marrón”, “Negro”, “Verde” y “Azul”.

El “Carbono Marrón” se refiere a las emisiones que se conocen como los gases de efecto invernadero tales como el  $\text{CO}_2$  y el metano ( $\text{CH}_4$ ). El “Carbono Negro” son las partículas resultantes de la combustión incompleta, como el hollín y el polvo, éstos ingresan a los océanos por medio de los aerosoles y la deposición fluvial, y puede ser la causa del 25% del calentamiento del planeta observado en los últimos 100 años. El carbono negro tiende a permanecer en la atmósfera durante días o semanas mientras que el “Carbono Marrón” permanece en la atmósfera aproximadamente un siglo (Nellemann *et al.* 2009). El “Carbono Verde” se refiere al carbono terrestre capturado por la fotosíntesis, es almacenado en la biomasa vegetal y en los suelos de los ecosistemas como los bosques, pero también en plantaciones, suelos agrícolas y pastizales. El “Carbono Azul” es el carbono capturado por organismos de los océanos (e.g. fitoplancton, pastos marinos) y es depositado en sus sedimentos, quedando almacenado por milenios (Nellemann *et al.* 2009).

Los océanos desempeñan un papel importante en el ciclo mundial de carbono, representando el mayor sumidero de carbono a largo plazo, ya que almacenan y redistribuyen aproximadamente el 93% del  $\text{CO}_2$  del planeta (Nellemann *et al.* 2009). Los hábitats oceánicos con cubierta vegetal, en particular los manglares, las marismas y pastos marinos, cubren menos del 0.5% del fondo del mar. Sin embargo constituyen los principales sumideros de carbono azul del planeta, almacenando quizá hasta el 71%, del total del carbono que hay en los sedimentos oceánicos. Aunque constituyen solo el 0.05% de la biomasa vegetal terrestre, almacenan una cantidad comparable en estas (entre 235 y 450 Tg C año<sup>-1</sup>), que es el equivalente a casi la mitad de las emisiones de todo el sector mundial del transporte, estimado en 1.000 Tg de C por año<sup>-1</sup> (Trumper *et al.* 2009).

Dentro de los organismos marinos las macroalgas son importantes en el ecosistema, ya que sirven de alimento y refugio a peces e invertebrados, modifican los fondos marinos al fijar los sustratos por medio de sus rizoides, absorben  $\text{CO}_2$ , enriquecen las aguas con oxígeno y aportan

nutrientes (Adey, 1998). La característica que tienen algunas algas marinas de incorporar carbonato de calcio a sus células hace de estas algas organismos estructurales de su hábitat. Dentro de los sistemas de carbono azul, las macroalgas no han sido consideradas con un papel importante. Sin embargo, diferentes autores consideran que las comunidades de macroalgas tienen el potencial de hacer contribuciones ecológicamente significativas hacia el secuestro de carbono (McLeod *et al.* 2011, Trevathan-Tackett *et al.* 2015). El objetivo de este trabajo fue revisar el papel de las Algas Verdes Calcáreas (AVC) como captadoras de carbono, ya que es uno de los menos contemplados dentro de los esfuerzos por combatir los gases de efecto invernadero, y a su vez analizar como el cambio climático puede afectar seriamente su presencia en los ecosistemas costeros.

### Las Algas Verdes Calcáreas (AVC)

Las AVC son parte de un grupo polifilético de especies pertenecientes a las Bryopsidales (*Halimeda*, *Penicillus*, *Rhipocephalus* y *Udotea*) y Dasycladales (*Acetabularia*, *Cymopolia* y *Neomeris*), y son conocidos como productores de carbonato debido a su alta producción de  $\text{CaCO}_3$  en las aguas tropicales de los ambientes costeros (Granier 2012). Como se mencionó anteriormente las macroalgas no han sido incluidas como parte del carbono azul debido a que en la mayoría de los estudios se indica que no secuestran carbono (Duarte *et al.* 2013), ya que crecen en sustratos rocosos lo que limita su capacidad para actuar como sumideros de carbono a largo plazo. Sin embargo, estos estudios se han realizado principalmente con las macroalgas carnosas y poco se ha trabajado con otros grupos algales que potencialmente tienen un papel importante dentro del ciclo del carbono azul, tal como las AVC, ya que puede actuar como una fuente rica de carbono y hacer contribuciones significativas en forma de detritus en el sedimento (Hill *et al.* 2015).

La calcificación implica la precipitación de iones de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{CO}_3^{2-}$  lo cual puede representar hasta la mitad de la producción mundial de  $\text{CaCO}_3$  de los océanos (Beach *et al.* 2003). El proceso de calcificación biogénica está estrechamente acoplado a la fotosíntesis, debido al cambio en el sistema de carbonato por absorción de  $\text{CO}_2$  y el aumento análogo del pH, lo que da como resultado una deposición de  $\text{CaCO}_3$  que se almacena en forma de sedimentos durante largos períodos de tiempo (ver en Fig. 1) (Borowitzka 1984). En la mayoría de los casos, el  $\text{CaCO}_3$  se encuentra como aragonita mineral, ya sea depositada en la superficie celular (e.g. *Penicillus*) o en espacios intercelulares (e.g. *Halimeda*) (Hill *et al.* 2015).

El género *Halimeda* (Fig. 2) contribuye con un 8% a la producción mundial total de carbonato (Freile y Hillis 1997). Sin embargo, se ha detectado que la producción de  $\text{CaCO}_3$  puede variar dependiendo de las diferentes regiones. Por ejemplo, la producción anual de *Halimeda* en Puerto Morelos, Quintana Roo se reporta en  $815 \text{ g/m}^2 \text{ año}^{-1}$  de  $\text{CaCO}_3$  (van Tussenbroek y Van Dijk 2007), mientras que en la producción en Panamá puede alcanzar  $2323 \text{ g/m}^2 \text{ año}^{-1}$   $\text{CaCO}_3$  (Freile y Hillis 1997). Esta capacidad hace que éstos calcificadores sean muy importantes para el almacenamiento de carbono y para la producción de sedimentos marinos que también contribuyen a la deposición de carbono (Díaz-Pulido *et al.* 2007). Además, se ha estimado que el rango de calcificación en el AVC *Halimeda opuntia* tiene una tasa de  $8.9 \text{ mg CaCO}_3 \text{ g}^{-1} \text{ h}^{-1}$  a la luz e incluso durante la obscuridad es capaz de calcificar a una tasa más reducida de  $6.4 \text{ mg CaCO}_3 \text{ g}^{-1} \text{ h}^{-1}$  (Vogel 2015).





Figura 1. Fondo marino compuesto de sedimento formado de algas verdes calcáreas en San Felipe, Yucatán, México. Fotografía de Andrea Chuc Contreras©.



Figura 2. Alga verde calcárea de la especie *Halimeda incrassata*. Fotografía de Andrea Chuc Contreras©.

## Carbono Azul

Los principales sumideros de carbono azul están referidos a las comunidades vegetales costeras. Sin embargo, el stock de carbono es formado por una combinación de fuentes autóctonas (derivados de productores primarios dentro del hábitat) y alóctonas (derivado de fuentes externas de carbono) (Hill *et al.* 2015).

Para diferenciar los distintos tipos de sumideros se considera la tasa de Producción: Respiración (P: R). Sí se tiene un P: R mayor que 1 es un sumidero de carbono, ya que remueve y almacena más carbono que el que libera, mientras que una relación de menos de 1 se considera una fuente de carbono neto. Sin embargo, en el caso de algunos sistemas costeros que tienen un P: R de menos de 1, es tan grande la cantidad del carbono alóctono que genera y que queda atrapado y secuestrado, que en realidad podría ser considerado como sumidero de carbono (Hill *et al.* 2015).

Asimismo, las macroalgas puedan hacer contribuciones significativas al secuestro global de carbono actuando como "Donadores de carbono", esto se da cuando un autótrofo "dona" carbono a otro "receptor" que finalmente secuestran ese carbono. Por lo tanto, los donantes del carbono hacen contribuciones indirectas al secuestro de carbono. Este movimiento de carbono de un sistema a otro es denominado "fuga de carbono" Esto puede verse en los ecosistemas de pastos marinos que tienen una alta capacidad de captura de partículas de carbono de otras fuentes (Gruber y Kemp 2010).

Para que un sistema sea un donante significativo de carbono, existen tres requisitos: (1) altas tasas de producción de biomasa; (2) transferencia efectiva de biomasa a los hábitats receptores y (3) el carbón del donante debe someterse a un secuestro eficiente de biomasa dentro de los hábitats receptores, de manera que evada la actividad microbiana (Hill *et al.* 2015). Los tres requisitos son necesarios, ninguna es redundante o sustituible y las macroalgas cubren con todos estos requisitos ya que tiene una alta producción de biomasa; la producción primaria (0.19-0.64 Pg C año<sup>-1</sup>) excede el de todos los hábitats costeros como pastos, marismas y manglares combinados (Duarte *et al.* 2013), transfieren el carbono a los hábitats vegetales costeros y que a su vez son secuestrados por éstos. En las macroalgas, el carbono alóctono puede contribuir tanto como la mitad del carbono orgánico total que se secuestra en un prado de pastos (Kennedy *et al.* 2010 en Hill *et al.* 2015).

## El cambio climático como precursor de la acidificación del océano y sus efectos en las AVC.

El cambio climático global ha sido provocado principalmente por el exceso de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, y cuando es absorbido por el océano, reacciona con el agua de mar, aumentando la acidez del agua y bajando por lo tanto el pH. El CO<sub>2</sub> absorbido reacciona con el agua de mar, formando ácido carbónico. Este ácido libera un ion de bicarbonato y uno de hidrógeno. A su vez, este ion de hidrógeno libre se une a los iones de carbonato libres en el agua, formando otro ion de bicarbonato que impide la absorción de carbonato disponibles para los organismos marinos (Hoegh-Guldberg y Bruno 2010). Estos cambios pueden interferir con el secuestro de CaCO<sub>3</sub> y dificulta la absorción de los elementos necesarios para que algunos organismos marinos tales como corales, almejas y algas, sean capaces de formar estructuras clave como caparazones y esqueletos

de  $\text{CaCO}_3$  (Kroeker *et al.* 2010). Si este proceso continúa en el océano, el medio donde viven se volverá tan corrosivo que podría disolver sus conchas y esqueletos.

En los últimos años, se han estudiado los efectos de la acidificación del océano en los organismos marinos y en los ecosistemas, especialmente en productores de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) y se ha detectado una relación entre la tasa de calcificación de muchos organismos y el nivel del pH del océano (Andersson *et al.* 2008). Para muchos organismos la producción de  $\text{CaCO}_3$  puede disminuir a medida que va disminuyendo el pH. Asimismo, concentraciones elevadas de  $\text{CO}_2$ , junto con el efecto ocasionado por las altas temperaturas, disminuye la calcificación neta (Koch *et al.* 2013).

Las AVC son un grupo de organismos que constituyen uno de los más significativos productores de  $\text{CaCO}_3$ , no obstante, son vulnerables a la acidificación del océano. El aumento del  $\text{CO}_2$  puede ocasionar la disminución de las algas calcáreas y favorecer el crecimiento de macroalgas carnosas y uno de los problemas es que no se conoce en su totalidad los efectos que tiene la acidificación en su producción primaria y su tasa de calcificación (Barry *et al.* 2013). Por lo cual, es fundamental conocer los mecanismos que intervienen en la calcificación y productividad primarias de las algas calcáreas, así como comprender sus necesidades fisiológicas y sus respuestas ecológicas a la acidificación del océano.

## Conclusión

Los ecosistemas costeros producen y acumulan grandes cantidades de carbono, incluso en mayores cantidades que los bosques terrestres. Sin embargo, son altamente vulnerables a los impactos del cambio climático como el aumento del nivel del mar, el aumento de la temperatura y la acidificación, siendo este último punto altamente importante para todos aquellos organismos capaces de incorporar carbonato de calcio en su sistema, ya que corren riesgo de sobrevivencia por el incremento del pH en el mar.

Las AVC proporcionan importantes servicios a los ecosistemas costeros, tanto en su papel como productoras de sedimentos calcáreos como su función en los procesos de producción y exportación de carbono. Sin embargo, poco se sabe sobre su biomasa real, su productividad y producción de  $\text{CaCO}_3$  así como la cantidad de carbono que absorbe y su impacto en el hábitat receptor.

Considerando la importancia de las AVC en los ecosistemas costeros, como captadores y donadores de Carbono, así como productores de sedimentos, y el impacto tan grande que puede tener la acidificación del océano en su fisiología, se hace más evidente la necesidad no solo de estudiarlas más a fondo si no de proteger estos ecosistemas que son altamente vulnerables.

## Referencias

- Adey WH. 1998. Coral reefs: algal structured and mediated ecosystems in shallow, turbulent, alkaline waters. *Journal of Phycology* 34: 393-406.
- Andersson AJ, Mackenzie FT y Bates NR. 2008. Life on the margin: implications of ocean acidification on Mg-calcite, high latitude and cold-water marine calcifiers. *Marine Ecology Progress Series* 373: 265-273.

- Bala G. 2013. Digesting 400 ppm for global mean CO<sub>2</sub> concentration. *Current Science* 104: 1471-1472.
- Barry SC, Frazer TK y Jacoby CA. 2013. Production and carbonate dynamics of *Halimeda incrassata* (Ellis) Lamouroux altered by *Thalassia testudinum* Banks and Soland ex König: *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 444: 73-80.
- Beach KL, Walters LJ, Vroom P, Smith C, Coyer J y Hunter C. 2003. Variability in the ecophysiology of *Halimeda* spp. (Chlorophyta, Bryopsidales) on conch reef, Florida Keys, USA: *Journal of Phycology* 39: 633-643.
- Borowitzka MA. 1984. Calcification in aquatic plants. *Plant, Cell and Environment* 7: 457-466.
- Díaz-Pulido G, McCook LJ, Larkum AWD, Lotze HK, Raven JA, Schaffelke B, Smith JE y Steeneck RS. 2007. Vulnerability of macroalgae of the Great Barrier Reef to climate change. En Johnson JE y Marshall P (Eds) *Climate Change and the Great Barrier Reef*. Reef Marine Park Authority and Australian Greenhouse Office, Australia. pp 154-192.
- Duarte CM, Losada IJ, Hendriks IE, Mazarrasa I y Marba N. 2013. The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation. *Nature Climate Change* 3: 961-968.
- Freile D y Hillis L. 1997. Carbonate productivity by *Halimeda incrassata* land in a proximal lagoon, Pico Feo, San Blas, Panama. In *Proceedings 8th International Coral Reef Symposium* 1: 767-772.
- Granier B. 2012. The contribution of calcareous green algae to the production of limestones: a review. *Geodiversitas* 34 (1): 35-60.
- Gruber RK y Kemp WM. 2010. Feedback effects in a coastal canopy-forming submersed plant bed. *Limnology and Oceanography* 55: 2285-2298.
- Hill R, Bellgrove A, Macreadie PI, Petrou K, Beardall J, Steven A y Ralph PJ. 2015. Can macroalgae contribute to blue carbon? An Australian perspective *Limnology and Oceanography* 60: 1689-1706
- Hoegh-Guldberg O y Bruno JF. 2010. The impact of climate change on the world's marine ecosystems: *Science* 328:1523-1528.
- Koch M, Bowes G, Ross C y Zhang XH. 2013. Climate change and ocean acidification effects on seagrasses and marine macroalgae: *Global Change Biology*. 19:103-132.
- Kroeker KJ, Kordas RL, Crim RN y Singh GG. 2010. Meta-analysis reveals negative yet variable effects of ocean acidification on marine organisms: *Ecology letters* 13: 1419-1434.
- McLeod E, Chmura GL, Bouillon S, Salm R, Björk M, Duarte CM, Lovelock CE, Schlesinger WH y Silliman BR. 2011. A blueprint for blue carbon: Toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO<sub>2</sub>. *Frontiers in Ecology and the Environment* 9: 552-560.
- Nellemann C, Corcoran E, Duarte CM, Valdés L, De Young C, Fonseca L y Grimsditch G. 2009. *Carbono Azul. Evaluación de una respuesta rápida*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, GRID-Arendal, www.grida.no. 51 pp.
- Trevathan-Tackett SM, Kelleway J y Macreadie PI. 2015 Comparison of marine macrophytes for their contributions to blue carbon sequestration. *Ecology* 96: 3043-3057
- Trumper K, Bertzky M, Dickson B, van der Heijden GM y Jenkins P. 2009. ¿La solución natural? El papel de los ecosistemas en la mitigación del cambio climático. *Evaluación rápida del PNUMA, WCMC del PNUMA, Cambridge, Reino Unido*. 65 pp

- van Tussenbroek BI y van Dijk JK. 2007. Spatial and temporal variability in biomass and production of Psammophytic *Halimeda incrassata* (Bryopsidales, Chlorophyta) in a Caribbean reef lagoon. *Journal of Phycology* 43:69-77
- Vogel N, Fabricius KE, Strahl J, Noonan SHC, Wild C y Uthicke S. 2015. Calcareous green alga *Halimeda* tolerates ocean. Coral Reefs acidification conditions at tropical carbon dioxide seeps. *Limnology and Oceanography* 60:263-275