

## Uso de técnicas de fechado con carbono radioactivo para interpretar ambientes históricos de bancos de rodolitos

### Use of radiocarbon dating to interpret past environments of maerl beds

C Blake<sup>1</sup>, C Maggs<sup>2</sup>, P Reimer<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Water Management Unit, Environment and Heritage Service, 17 Antrim Road, Lisburn, Co. Antrim, BT28 3AL, Northern Ireland. E-mail: charmaine.blake@doeni.gov.uk

<sup>2</sup> School of Biological Sciences, Queen's University Belfast, Medical Biology Centre, 97 Lisburn Road, Belfast, BT9 7BL, Northern Ireland.

<sup>3</sup> Chrono Centre, Queen's University Belfast, 42 Fitzwilliam Street, Belfast, BT9 6AX, Northern Ireland.

#### Resumen

En muchas partes del mundo existen bancos de algas coralinas no geniculadas, conocidos como bancos de rodolitos o *maerl*, los cuales se encuentran protegidos por la legislación europea debido a su alto valor para la conservación; sin embargo, alrededor de Europa existen áreas significativas de depósitos de rodolitos muertos pero las causas del deterioro de estos antiguos hábitats no siempre son evidentes. En este estudio se utilizaron técnicas de fechado con carbono radiactivo para limitar, entre un gran número de posibilidades, los momentos históricos o prehistóricos en que estos bancos de rodolitos pudieron haber muerto. Se resalta la amenaza de enterramiento de estos preciados hábitats, lo cual tendría implicaciones contemporáneas para la conservación. Se encontró que el banco de *maerl* de Strangford Lough, Irlanda del Norte, murió alrededor de 4200 <sup>14</sup>C AP (antes del presente, 1950 AD), la misma época reportada previamente para la muerte de un banco de rodolitos en Marsella, Francia, y que coincide con evidencias de un periodo importante de cambios climáticos. El estudio de caso de Belfast Lough resalta la amenaza moderna que representa para los bancos de rodolitos la sedimentación generada por el dragado de canales, lo que complementa trabajo experimental previo.

*Palabras clave:* rodolito, *maerl*, Holoceno, fechado con carbono radiactivo, cambio climático.

#### Abstract

Beds of nongeniculate coralline algae, known as rhodolith beds or maerl, occur throughout the world. They are protected under European legislation due to their high conservation value; however, within Europe there are significant areas of dead maerl deposits and the causes of the demise of these past habitats is not always clear. In this study we utilize radiocarbon dating techniques to constrain the time of the maerl bed deaths from a number of historical or pre-historical possibilities. We highlight the threat from burial to these precious habitats, which has implications for contemporary conservation. We found that a maerl bed in Strangford Lough, Northern Ireland, was killed around 4200 <sup>14</sup>C BP (before present, AD 1950), which is the same as a previously reported maerl bed death in Marseille, France. This also coincides with evidence of a significant period of climatic change. The case study of Belfast Lough highlights the modern threat to maerl bed by sedimentation caused by channel dredging, which complements previous experimental work.

*Key words:* maerl, rhodolith, Holocene, radiocarbon dating, climate change.

#### Introducción

El término *maerl* (de la palabra bretona *maërl*) es empleado para los bancos submareales sueltos de algas rojas coralinas. En algunas regiones fuera de Europa normalmente se utiliza el término rodolito en vez de *maerl*. Sus talos rígidos y altamente ramificados se entrelazan para formar una rejilla tridimensional que proporciona valiosos nichos ecológicos para diversas especies de algas e invertebrados, algunas de las cuales sólo se encuentran en este hábitat (Keegan 1974, Bosence 1976, Foster 2001, Steller *et al.* 2003, McCormack 2006). Algunos estudios recientes también han destacado la importancia de los bancos de rodolitos o *maerl* como criaderos para especies de gádidos y

#### Introduction

Maerl (from the Breton word *maërl*) is a general term used for loose-lying subtidal beds of coralline red algae. In some regions outside Europe the term rhodolith is usually used instead of maerl. The highly branched rigid thalli interlock to form a three-dimensional lattice, which provides valuable ecological niches for a diverse range of seaweed and invertebrate species, some of which may be confined to the maerl habitat (Keegan 1974, Bosence 1976, Foster 2001, Steller *et al.* 2003, McCormack 2006). Recent studies have also highlighted the importance of maerl beds as nursery grounds for commercially harvested gadoid and bivalve species (Kamenos *et al.* 2003,

bivalvos de interés comercial (Kamenos *et al.* 2003, 2004). El valor para la conservación de los bancos de rodolitos ha sido contemplado en la legislación de la Unión Europea y dos especies formadoras de *maerl*, *Phymatolithon calcareum* y *Lithothamnion corallioides*, están incluidas en el Anexo V de la Directiva de la Unión Europea 92/43/EEC (Conservación de los Hábitats Naturales y de la Flora y Fauna Silvestres), como especies de interés para la comunidad cuya recolección silvestre y explotación pueden estar sujetas a medidas de manejo. Los bancos de *maerl* europeos son considerados un recurso no renovable por su muy lenta tasa de crecimiento, de aproximadamente 1 mm (0.5–1.5 mm) por año (Bosence y Wilson 2003, Blake y Maggs 2003). Sin embargo, como los esqueletos de carbonato de calcio de los rodolitos subsisten, sus depósitos acumulados a lo largo de miles de años se pueden convertir en depósitos gruesos y extensos con material vivo cubriendo las capas muertas inferiores (Freiwald *et al.* 1991, Birkett *et al.* 1998).

Los bancos de *maerl* extintos e intactos y las comunidades fósiles que albergan han sido estudiados como indicadores de las condiciones ecológicas que existieron en el pasado (Cintra-Buenrostro *et al.* 2002). Algunos de estos bancos fósiles de algas coralinas o *maerl* se encuentran por encima del nivel del mar actual y sirven de registro de los mayores niveles del mar en tiempos pasados (Boyd 1985, Freiwald *et al.* 1991, Sartoretto *et al.* 1996, Cintra-Buenrostro *et al.* 2002). En otras áreas, como en Carraroe en la costa oeste de Irlanda, gran cantidad de rodolitos muertos forman playas conocidas como “playas de coral”. Los rodolitos (*maerl*) son una importante fuente de carbonato en estas zonas (Scoffin 1988, Halfar *et al.* 2000). Durante el siglo pasado se reconocieron y estudiaron varios aspectos de la taxonomía y ecología de los bancos de rodolitos antiguos, fósiles, extintos o históricos (e.g., Bosence 1983, Freiwald *et al.* 1991, Basso y Tomaselli 1994, Cintra-Buenrostro *et al.* 2002). La información con que se cuenta sobre la extinción de estos antiguos hábitats será de gran importancia para la implementación de estrategias modernas para la conservación de los principales bancos de *maerl*. Es posible datar sustancias que contienen carbono, tales como el carbonato de calcio en algas coralinas, mediante técnicas de fechado con carbono radioactivo. Esto indica fechas de eventos ecológicos pasados, asociados con estos bancos.

Se estudiaron diferentes ambientes en el Reino Unido que cuentan con depósitos de *maerl* extintos, utilizando técnicas de fechado con carbono radioactivo para determinar su antigüedad y las probables causas de su muerte por posibles eventos históricos. Estudios de laboratorio han mostrado que su enterramiento por sedimentos finos anóxicos es particularmente dañino (Wilson *et al.* 2004), y en un estudio de campo se encontró que los depósitos de sedimentos provenientes del dragado de almejas los perjudican (Hall-Spencer y Moore 2000). En este estudio se emplea el fechado con carbono radioactivo para discriminar entre posibles causas de extinciones históricas o prehistóricas, y la evidencia obtenida se utiliza para evaluar las amenazas potenciales para los actuales hábitats de *maerl*. El

2004). The conservation value of *maerl* is recognized under EU legislation and two *maerl*-forming species, *Phymatolithon calcareum* and *Lithothamnion corallioides*, are included in Annex V of the European Community Directive 92/43/EEC (Conservation of Natural Habitats and of Wild Flora and Fauna), as species of community interest whose taking in the wild and exploitation may be subject to management measures. European *maerl* is considered a non-renewable resource due to its very slow growth rate of approximately 1 mm (0.5–1.5 mm) per year (Bosence and Wilson 2003, Blake and Maggs 2003). However, as the calcium carbonate skeletons of *maerl* are retained, deposits can accumulate over thousands of years into extensive, thick deposits with live material overlaying dead layers (Freiwald *et al.* 1991, Birkett *et al.* 1998).

Intact dead *maerl* beds and the fossil assemblages they contain have been examined as indicators of past ecological conditions (Cintra-Buenrostro *et al.* 2002). Some of these fossil beds of coralline algae or *maerl* are above present sea level and are evidence records of past higher sea levels (Boyd 1985, Freiwald *et al.* 1991, Sartoretto *et al.* 1996, Cintra-Buenrostro *et al.* 2002). In other areas, such as at Carraroe on the west coast of Ireland, large quantities of dead in-washed *maerl* form beaches known as “coral strands”. *Maerl* is an important carbonate source in these areas (Scoffin 1988, Halfar *et al.* 2000). Various aspects of the taxonomy and ecology of ancient, fossil, dead or historic coralline algal beds have been recognized and have been investigated over the last century (e.g., Bosence 1983, Freiwald *et al.* 1991, Basso and Tomaselli 1994, Cintra-Buenrostro *et al.* 2002). Information on the demise of these past habitats will be of great importance for modern conservation management of significant *maerl* beds. It is possible to date carbon-containing substances, such as calcium carbonate in coralline algae, by radiocarbon dating. This indicates past dates of ecological events associated with *maerl* beds.

We examine different environments in the United Kingdom where dead *maerl* deposits are located and use radiocarbon dating techniques to determine age and thus likely causes of death from possible historical events. Laboratory studies have indicated that burial in fine anoxic sediments is particularly harmful (Wilson *et al.* 2004), and a field study determined that sediment deposited from scallop dredging was detrimental (Hall-Spencer and Moore 2000). In this study, radiocarbon dating is used to decide between possible historical or prehistoric causes of extinctions, and the evidence gathered is used to evaluate potential threats to present day *maerl* habitats. The local marine radiocarbon reservoir effect needed for calibration of the  $^{14}\text{C}$  measurements was previously determined as 406 years for the northeast coast of Ireland (Blake 2005).

## Study sites

### *Sketrick, Strangford Lough, Northern Ireland*

This area is located within the protected sea lough of Strangford, Northern Ireland, a Marine Nature Reserve. The

efecto local del almacenaje de carbono radiactivo en el medio marino que se requiere para la calibración de las mediciones de  $^{14}\text{C}$  se estimó previamente en 406 años para la costa norte de Irlanda (Blake 2005).

## Sitios de estudio

### *Sketrick, Strangford Lough, Irlanda del Norte*

Esta zona se localiza dentro de la reserva marina constituida por el fiordo protegido de Strangford, Irlanda del Norte, el cual contiene al sur un importante banco de *maerl* vivo (dominado por *P. calcareum*) en el lugar conocido como Zara Shoal. También se encuentran zonas dispersas de rodolitos (*maerl*) vivos en otros sitios, tales como la región conocida como Sketrick sobre la costa occidental (fig. 1a, b), una región de fuertes corrientes de marea que son forzadas a través de los canales entre las islas. En esta región se encuentran bancos vivos de *P. calcareum*, aunque de manera poco frecuente, y *Lithothamnion glaciale* que crece fija a rocas más que de forma libre. Debajo de esta área donde se encuentran bancos de rodolitos vivos hay un depósito discontinuo de *maerl* en los sedimentos, el cual tiene una profundidad de al menos 30 cm en casi todo el canal. La estructura del hábitat no es la de un banco de *maerl* normal de crecimiento continuo con depósitos de capas algales, sino que muestra una clara discontinuidad con el depósito anterior ahora mezclado con lodo y rodolitos vivos dispersos.

Las posibles causas de la muerte de este banco de *maerl* son las fluctuaciones geológicas del nivel del mar y los impactos humanos tanto históricos como modernos, incluyendo la

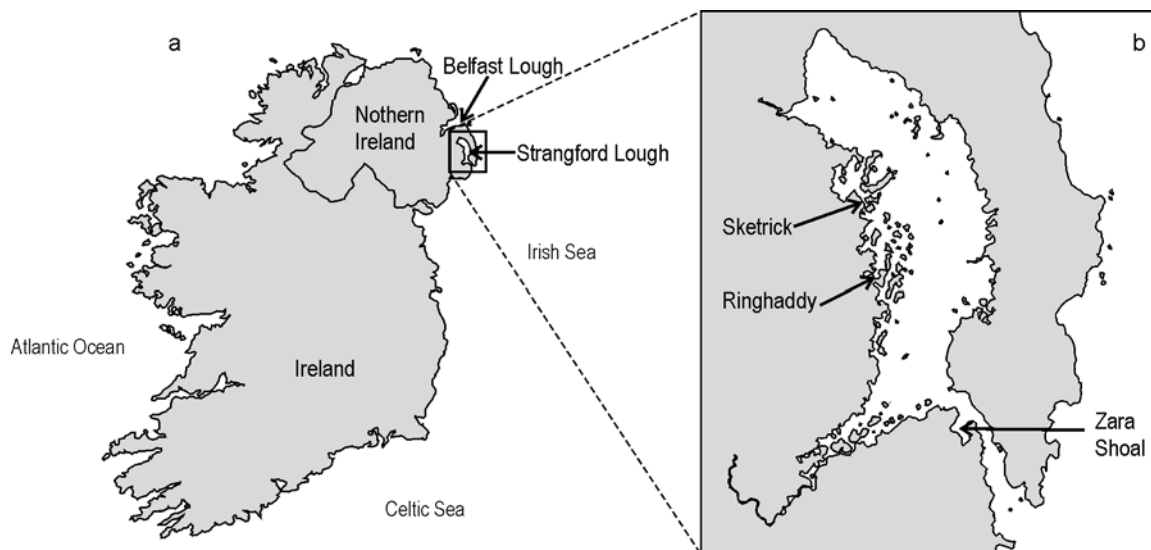
lough contains a significant live maerl bed (dominated by *P. calcareum*) located at the southern end of the lough at Zara Shoal. However, sparse areas of live maerl also occur in other locations, such as the region known as Sketrick along the western shore (fig. 1a, b). The region is an area of high tidal currents as tidal flow is forced around the island channels. Live *P. calcareum* occurs infrequently in this area, and also live *Lithothamnion glaciale* grows attached to stones rather than in a free living form. Beneath this area where live maerl occurs there is a discontinuous deposit of maerl in sediment, which is at least 30 cm deep throughout most of the channel. The habitat structure is not that of a normal maerl bed of continuous growth and deposition of algal layers, but shows clear discontinuity with the past deposit now contained in mud and sparse live maerl.

The possible causes of the maerl bed death are geological sea-level fluctuations, historic human impacts, or modern human impacts including the building of island causeways towards the end of the 19th century.

### *Belfast Lough, Northern Ireland*

Maerl was first recorded from Belfast Lough by Johnson and Hensen in 1896. Dead maerl is regularly retrieved from an area near Kilroot at the north shore of the lough (fig. 1a). There are several possibilities for the demise of this deposit, including geological sea-level fluctuations and modern human impact.

Industrial wastes, 1760 onwards: Towards the end of the 18th century Belfast supported glass and lime works, as well as cotton and then linen production. All of the discharges from



**Figura 1.** Sitios de estudio en Irlanda del Norte. (a) Belfast Lough, donde se encuentra un depósito de *maerl* muerto ( $54^{\circ}42'95''$  N,  $5^{\circ}45'73''$  W). (b) Strangford Lough, donde se encuentran bancos de *maerl* vivos, así como un banco de *maerl* subfósil cerca de la isla de Sketrick ( $54^{\circ}29'27''$  N,  $5^{\circ}38'53''$  W).

**Figure 1.** Study sites in Northern Ireland. (a) Belfast Lough, containing a dead maerl deposit ( $54^{\circ}42'95''$  N,  $5^{\circ}45'73''$  W). (b) Strangford Lough, containing live maerl beds, in addition to a subfossil maerl bed deposit near Sketrick Island ( $54^{\circ}29'27''$  N,  $5^{\circ}38'53''$  W).

construcción de carreteras entre las islas a finales del siglo XIX.

### *Belfast Lough, Irlanda del Norte*

Los bancos de *maerl* de Belfast Lough fueron registrados por primera vez por Johnson y Hensen en 1896. En una zona cerca de Kilroot en la costa norte del fiordo, regularmente se extraen rodolitos muertos (fig. 1a). Existen varias posibles causas de la extinción de este depósito, incluyendo fluctuaciones geológicas del nivel del mar e impactos humanos modernos.

Desperdicios industriales, a partir de 1760: Hacia finales del siglo XVIII, en Belfast había fábricas de vidrio y cal, y también se producía algodón y luego lino. Todos los restos de la producción de lino eran desechados a través de canales que desembocaban en Belfast Lough, resultando en una creciente descarga de diversos químicos (Owen 1917) que bien pudieron haber afectado los bancos de *maerl*.

Contaminación por aguas residuales, a partir de c. 1780: La población de Belfast se incrementó considerablemente durante los años 1800 hasta principios del siglo XX. Los principales periodos de rápido crecimiento fueron alrededor de los años 1860 y 1890. La contaminación evidentemente era un problema serio a principios del siglo XIX, ya que las personas sorprendidas tirando cenizas, tierra o basura en el río recibían una multa de cinco chelines por estos delitos, y si no les era posible pagar podían ser enviados a la correccional donde recibían un latigazo o eran sometidos a trabajo forzado hasta por cuatro días por un delito (Owen 1917).

Dragado de canales, 1840–1849: Durante este periodo, el dragado intenso y los terrenos ganados al mar dieron como resultado una isla de 17 acres y un nuevo canal que cortaba a través de los llanos fangosos de marea. Alrededor de 1910 hubo un segundo periodo de dragado cuando el *Titanic* fue construido en los muelles de Belfast (Owen 1917). Cabe suponer que la sedimentación causada por este dragado tendría un efecto perjudicial sobre un banco de *maerl* (Hall-Spencer y Moore 2000, Wilson *et al.* 2004).

Construcción de la central eléctrica de Kilroot, principios de los años 1980: La central eléctrica se localiza en las inmediaciones de un banco de *maerl* e incluye un gran espigón. Esta construcción podría haber causado un incremento en la turbidez del agua y la sedimentación sobre los sustratos circundantes.

### **Material y métodos**

Todas las muestras fueron seleccionadas para minimizar la posibilidad de producir fechados falsos de carbono radioactivo. En el caso de las muestras de *maerl*, de ser posible se escogieron muestras prístinas para minimizar la posibilidad de haber incorporado carbono de los sedimentos en su estructura. Las muestras fueron enjuagadas cuidadosamente con agua destilada y secadas al aire, y luego almacenadas en contenedores o bolsas selladas. Se tuvo cuidado de analizar muestras de

linen production were disposed of in waterways leading into Belfast Lough, leading to a large increase in diverse chemicals being discharged (Owen 1917), which would possibly have affected the *maerl*.

Sewage pollution, c. 1780 onwards: The population of Belfast rose fairly intensely through the 1800s into the 1900s. The main periods of rapid growth were around the 1860s and 1890s. Pollution was evidently a serious problem in the early 1800s as persons throwing ashes, dirt or filth into the river were liable to be fined five shillings for each offence, and if they could not pay they could be sent to the House of Correction to be whipped once or kept for hard labour for up to four days for one fault (Owen 1917).

Channel dredging, 1840–1849: In this period extensive dredging and land reclamation created a 17-acre island and cut a new channel into the tidal mudflats. There was also a second period of dredging around 1910 when the *Titanic* was built in Belfast docks (Owen 1917). It would be expected that settlement of sediment caused by this dredging would have a detrimental effect on a *maerl* bed (Hall-Spencer and Moore 2000, Wilson *et al.* 2004).

Construction of Kilroot Power Station, early 1980s: The power station is in the immediate vicinity of the *maerl* bed and includes a large jetty. This construction may have resulted in an increase in water turbidity and sedimentation onto the surrounding substrata.

### **Material and methods**

All samples were selected to minimize the chance of producing false radiocarbon dates. In the case of *maerl* samples, pristine samples were selected where possible to minimize the chance of sedimentary carbon having been incorporated into the structure. Samples were rinsed thoroughly in distilled water and then air-dried. Samples were then stored dry in sealed containers or bags. Care was taken to analyze samples with known context, where there was minimal chance of reworking from another area. For example, the samples taken from intact buried *maerl* beds in Strangford Lough contained intact infauna and had high structural complexity and no physical indication of reworking.

Accelerator mass spectrometry (AMS) analysis was carried out at a United Kingdom national facility, Scottish Universities Environmental Research Centre (SUERC), in 2000 and 2003. The AMS dating was also carried out by Dr P Reimer at the Center for Accelerated Mass Spectrometry (CAMS) in 2003; CAMS, at Lawrence Livermore National Laboratory (USA), who also tested the outside of the sample containers from the laboratory and found no  $^{14}\text{C}$  contamination.

The *maerl* was cleaned in distilled water and then etched with HCl to remove the outmost 20% by weight of carbonate. All samples were then rinsed free of acid and freeze-dried. Each sample was homogenized and a known weight of the pre-treated sample was hydrolyzed to  $\text{CO}_2$  using 85% orthophos-

contextos conocidos en los casos en que había una mínima posibilidad de que éstas hubieran sido retrabajadas en otra zona. Por ejemplo, las muestras recolectadas de los bancos intactos de *maerl* enterrados en Strangford Lough contenían su infauna intacta, tenían una alta complejidad estructural y no presentaban alguna indicación física de retrabajo.

Se realizaron análisis de espectrometría de masa con aceleradores (AMS) en un centro de investigación ambiental del Reino Unido (Scottish Universities Environmental Research Centre, SUERC) en 2000 y 2003. El fechado con AMS también fue realizado en 2003 por la Dra P Reimer en el Centro para la Espectrometría de Masas con Aceleradores (Center for Accelerated Mass Spectrometry, CAMS) del Laboratorio Nacional Lawrence Livermore (EUA), donde también se analizó la parte exterior de los contenedores de muestras del laboratorio y no se encontró contaminación de  $^{14}\text{C}$ .

Las muestras de *maerl* fueron lavadas con agua destilada y luego tratadas con HCl para eliminar la capa más externa de carbonato correspondiente al 20% de su peso. Todas las muestras fueron enjuagadas posteriormente para eliminar el ácido y liofilizadas. Cada muestra se homogeneizó, y un peso conocido de la muestra pretratada se hidrolizó hasta convertirlo en  $\text{CO}_2$  usando ácido ortofosfórico al 85%, a 25°C. El gas se convirtió en grafito reduciéndolo con Fe/Zn o  $\text{H}_2$  (SUERC, CAMS) y las muestras así obtenidas fueron analizadas en la Universidad de Arizona (laboratorio de NSF-AMS) o en CAMS. Los resultados de  $^{14}\text{C}$  fueron normalizados a las fracciones de  $\delta^{13}\text{C}$  y se

phoric acid at 25°C. The gas was converted to graphite using Fe/Zn or  $\text{H}_2$  reduction (SUERC, CAMS). These samples were then analyzed at the University of Arizona NSF-AMS facility or CAMS. The  $^{14}\text{C}$  results were normalized for  $\delta^{13}\text{C}$  fractionation and reported in tables 1 and 2 as conventional radiocarbon ages as defined by Stuiver and Polach (1977) and as percent modern carbon (Rafter and Grant-Taylor 1972). Measurement at CAMS used an estimate of  $\delta^{13}\text{C}$  of  $0 \pm 2\%$ . Calibration was calculated using the Marine04 curve (Hughen *et al.* 2004) with a  $\Delta R$  value of 406 based on measurements of known age shells from Belfast Lough (Blake 2005). Calibrated results are given for 68% (1  $\sigma$ ) and/or 95% (2  $\sigma$ ) probabilities.

*Sketrick, Strangford Lough, Northern Ireland*

Scuba divers collected live maerl samples from the seabed at approximately 4 m depth (54°29'27" N, 5°38'53" W) and one thallus was randomly selected for dating. Subfossil maerl samples were excavated by hand by divers from the surface layer (30 cm) of the subfossil maerl bed. Three thalli were randomly selected that had been collected from different parts of the maerl bed approximately 50 m apart. The subfossil bed has been previously studied and cores into the deposit have always contained intact maerl thalli rather than gravel (Blake 2005). The maerl bed appears intact throughout a channel approximately 400 m by 80 m. Scanning electron microscopy (SEM) was also used to diagnose the subfossil species.

**Tabla 1.** Resultados del análisis de espectrometría de masas con aceleradores (AMS) para las muestras de *maerl* vivo (*Phymatolithon calcareum*) y subfósil (*Lithothamnion glaciale*) de la isla de Sketrick.

**Table 1.** Accelerator mass spectrometry (AMS) results for live (*Phymatolithon calcareum*) and subfossil (*Lithothamnion glaciale*) maerl at Sketrick Island.

Sample Laboratory ID	$^{14}\text{C}$ enrichment (% modern $\pm 1 \sigma$ )	Conventional $^{14}\text{C}$ age (years BP 1 $\sigma$ )*	2 $\sigma$ Age range (cal BC)*
Sketrick live CAMS-70058	137.35 $\pm$ 0.55	>Modern	>Modern
Sketrick fossil 1 CAMS-65898	59.34 $\pm$ 0.03	4190 $\pm$ 50	2454–2185
Sketrick fossil 2 CAMS-65899	59.85 $\pm$ 0.27	4120 $\pm$ 40	2346–2110
Sketrick fossil 3 CAMS-65900	59.64 $\pm$ 0.28	4150 $\pm$ 40	2389–2145

\* BP = before present; BC = before Christ.

**Tabla 2.** Resultados del análisis de espectrometría de masas con aceleradores (AMS) para las muestras de *maerl* de Belfast Lough. Se presentan dos intervalos para SUERC-1913 debido a la curva de calibración.

**Table 2.** Accelerator mass spectrometry (AMS) results for Belfast Lough maerl. Two ranges are presented for SUERC-1913 due to the calibration curve.

Sample Laboratory ID	$^{14}\text{C}$ enrichment (% modern $\pm 1 \sigma$ )	Conventional $^{14}\text{C}$ age (years BP 1 $\sigma$ )	1 $\sigma$ Age range (cal AD)	2 $\sigma$ Age range (cal AD)
Belfast maerl 1 SUERC-1904	94.40 (0.37)	463 $\pm$ 32	1865–1950	1809–1950
Belfast maerl 2 SUERC-1913	94.35 (0.27)	467 $\pm$ 23	1862–1906 1917–1950	1830–1950

presentan en las tablas 1 y 2 como edades convencionales de carbono radiactivo, según la definición de Stuiver y Polach (1977), y como porcentaje de carbono moderno (Rafter y Grant-Taylor 1972). Las mediciones en CAMS emplearon una estimación para  $\delta^{13}\text{C}$  de  $0 \pm 2\%$ . La calibración se realizó utilizando la curva de Marine04 (Hughen *et al.* 2004) con un valor de  $\Delta R$  de 406 con base en mediciones hechas en conchas de edades conocidas de Belfast Lough (Blake 2005). Se presentan los resultados calibrados para niveles de probabilidad de 68% (1  $\sigma$ ) y/o 95% (2  $\sigma$ ).

#### *Sketrick, Strangford Lough, Irlanda del Norte*

Las muestras de rodolitos (*maerl*) vivos fueron recolectadas del fondo del mar por buzos con equipo autónomo a una profundidad de alrededor de 4 m (54°29'27" N, 5°38'53" W), escogiéndose al azar un talo para el fechado. Las muestras de rodolitos subfósiles fueron excavadas, a mano por los buzos, de la capa superficial (30 cm) de un banco de *maerl* subfósil. Se seleccionaron al azar tres talos que habían sido recolectados de diferentes partes del banco, separadas entre sí por unos 50 m. Este banco subfósil ya ha sido estudiado y los núcleos extraídos de sus depósitos siempre han contenido más bien talos rodolíticos intactos que grava (Blake 2005). El banco de *maerl* se observa intacto a lo largo de un canal de aproximadamente 400 m por 80 m. Para diagnosticar las muestras subfósiles, se utilizó un microscopio electrónico de barrido.

#### *Belfast Lough, Irlanda del Norte*

Se utilizó una draga tipo Day (0.1 m<sup>2</sup> y <80 cm de profundidad) para recolectar muestras bénticas y obtener material de *maerl* muerto. Las muestras recolectadas en verano de 2001 cerca de la central eléctrica de Kilroot (54°42'95" N, 5°45'73" W) fueron congeladas al regresar al laboratorio. Se seleccionó un poco de *maerl* de la muestra y se enjuagó y secó al aire. Dos pedazos pequeños que aparentaban ser los más recientemente muertos por su ligera coloración y mínimo intemperismo fueron seleccionados y fechados mediante AMS. No se ha determinado aún la extensión de este depósito de *maerl*, pero regularmente se encuentran trozos de éste durante los habituales muestreos bénticos que se realizan en la zona.

### Resultados

#### *Sketrick, Strangford Lough, Irlanda del Norte*

Los resultados se presentan en la tabla 1. La muestra viva tenía una gran cantidad de <sup>14</sup>C, mayor a la máxima señal de las pruebas nucleares en el Mar del Norte o cualquier otro registro marino (Weidman y Jones 1993). Las tres muestras subfósiles dieron una fecha similar, dentro del intervalo de 2454 a 2110 cal AC (4120 a 4190 cal AP). La evaluación con el microscopio electrónico de barrido indicó que el depósito de *maerl* subfósil resultó ser de *L. glaciale* de vida libre. La estructura

#### *Belfast Lough, Northern Ireland*

A Day grab (0.1 m<sup>2</sup> and less than 80 cm depth) was deployed to collect benthic samples and dead *maerl* material was retained in the grab. Samples collected in summer 2001 near Kilroot Power Station (54°42'95" N, 5°45'73" W) were frozen on return to the laboratory. *Maerl* was picked out of the sample, rinsed and air-dried. Two small pieces of *maerl* that appeared most recently dead by their light colouration and minimal weathering were selected and dated using AMS. The extent of this *maerl* deposit is not yet defined, but deposits are repeatedly recovered during routine benthic sampling in the area.

### Results

#### *Sketrick, Strangford Lough, Northern Ireland*

Results are presented in table 1. The live sample had a high quantity of <sup>14</sup>C, above the peak of the nuclear-testing signal in the North Sea or any other marine record (Weidman and Jones 1993). The three subfossil samples were close in date and fall within the range of 2454–2110 cal BC (4120–4190 cal BP). The SEM investigation revealed that the subfossil *maerl* deposit was free-living *L. glaciale*. Surface structure of the thalli also appeared intact and unweathered with attached animals, indicating that the deposit had been buried rapidly (fig. 2). The subfossil *maerl* extends between Rainey and Sketrick Islands, through the channel with the mainland to between Rainey and Mahee Islands, and south to Ringhaddy.

#### *Belfast Lough, Northern Ireland*

The AMS results for Belfast Lough *maerl* are presented in table 2. The results show from the thalli sampled that the *maerl* bed appears to have died before 1809 AD.

### Discussion

#### *Sketrick, Strangford Lough, Northern Ireland*

The live sample from Sketrick Island showed a high level of <sup>14</sup>C. In the case of Strangford Lough and the northern Irish Sea, the most likely source is the Sellafield nuclear power station, which is approximately 130 km in an eastern direction from the mouth of the lough.

In a normal development cycle of a *maerl* deposit the lower layers become slowly buried and die, but are also reduced to smaller fragments or washed into gravel (Freiwald *et al.* 1991, Birkett *et al.* 1998, Foster 2001). The lack of gravel suggests that the normal *maerl* bed development cycle did not occur and it has remained protected in the mud until its recent exposure. The location of subfossil *maerl* close to the Sketrick Island causeway is interesting as the area is now a shallow intertidal mud-flat. Before construction of the causeway the tidal streams

superficial de los talos también se observó intacta y sin intemperismo, con animales pegados, lo que indica que el depósito había sido enterrado rápidamente (fig. 2). El depósito se extiende de entre las islas Rainey y Sketrick, por el canal, hasta entre las islas Rainey y Mahee, y hacia al sur hasta Ringhaddy.

#### *Belfast Lough, Irlanda del Norte*

Los resultados del análisis por AMS para las muestras de *maerl* de Belfast Lough se presentan en la tabla 2. Los talos estudiados indican que el banco de *maerl* parece haber muerto antes de 1809 DC.

#### Discusión

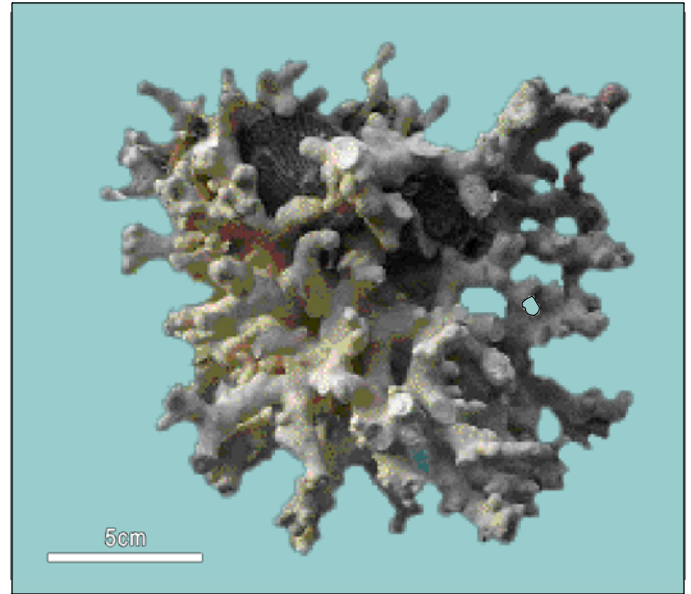
##### *Sketrick, Strangford Lough, Irlanda del Norte*

La muestra viva de la isla de Sketrick presentó un alto nivel de  $^{14}\text{C}$ . En el caso de Strangford Lough y la parte norte del Mar de Irlanda, la fuente más probable de éste es la planta nuclear Sellafield, la cual se encuentra a aproximadamente 130 km al este de la boca del fiordo.

En un ciclo normal de desarrollo de un depósito de *maerl* las capas inferiores se van enterrando lentamente y mueren, pero también son reducidas a fragmentos más pequeños o erosionadas por el agua hasta convertirse en grava (Freiwald *et al.* 1991, Birkett *et al.* 1998, Foster 2001). La ausencia de grava sugiere que este ciclo normal de desarrollo aquí no sucedió y que este banco ha permanecido protegido en el fango hasta su reciente descubrimiento. La localización de rodolitos subfósiles cerca de la carretera a la isla de Sketrick es interesante ya que actualmente la zona es una llanura intermareal somera de fango. Antes de la construcción de la carretera, las corrientes de marea hubieran fluido a través del canal y hubieran proporcionado un hábitat adecuado para los rodolitos.

Los resultados de este estudio indican que aparentemente el banco de *maerl* subfósil en la región de Sketrick era extenso, pero que en algún momento alrededor de 4120–4190 cal AP fue sepultado por fango. Se concluye que pudiera haber existido un evento de extinción en este sitio dadas las fechas de carbono radiactivo extremadamente similares de tres talos de *maerl* de diferentes partes superficiales del depósito. Otra evidencia de un evento de extinción fue que los rodolitos subfósiles se encontraban casi intactos, algunas veces en trozos grandes, y no estaban erosionados.

Para las muestras subfósiles de Sketrick se obtuvo un fechado de 2454–2110 cal AC (4120–4190 cal AP). La Edad de Bronce abarcó desde aproximadamente 2400 AC hasta 500 AC; por tanto, estas muestras de *maerl* son de la Edad de Bronce temprana, después del periodo neolítico de 2400 a 1500 AC (Waddell 2000). Smith y Goddard (1991) clasificaron la etapa de 4900 a 3880 AP como los inicios del periodo agrícola, cuando el declive del olmo y el pino, así como el surgimiento de la agricultura, se observan claramente en los registros de polen de Irlanda del Norte (Smith y Goddard 1991), pero no siempre



**Figura 2.** Rodolito (*maerl*) subfósil (*Lithothamnion glaciale*) de Strangford Lough, con una venera juvenil incrustada en su estructura (Blake 2005).  
**Figure 2.** Subfossil maerl (*Lithothamnion glaciale*) from Strangford Lough. A juvenile scallop is also shown embedded within the structure (Blake 2005).

would have flowed through the channel and would have provided a suitable habitat for maerl.

From this investigation it seems likely that the subfossil maerl bed was extensive in the Sketrick region, but at some time around 4120–4190 cal BP it was smothered by mud. We conclude that there may have been an extinction event at this site, due to the extremely similar radiocarbon ages of three different maerl thalli from the surface of the deposit. Other evidence of an extinction event is that the subfossil maerl is mainly intact, sometimes in large pieces, and had not been eroded.

The subfossil samples from Sketrick were dated 2454–2110 cal BC (4120–4190 cal BP). The Bronze Age period spanned approximately 2400 BC until 500 BC; therefore, these maerl samples are from the Early Bronze Age following the Neolithic period, 2400 to 1500 BC (Waddell 2000). Smith and Goddard (1991) classify the stage 4900–3880 BP as the early farming period. In the early part of this period the decline of the Elm and Pine, and emergence of agriculture are clearly seen in pollen records from Northern Ireland (Smith and Goddard 1991), but there is not always evidence for agriculture (Pilcher and Goddard 1979). Therefore, the final Pine decline may have been driven by climate and the correlation with the onset of the Bronze Age clearances may be coincidental (Smith and Goddard 1991). In addition, the decline of Elm, which is evident in Sluggan Bog, Co. Antrim at 4200 BP, has also been correlated with climatic change (Smith and Goddard 1991). Climatic fluctuation during this time period could have had an effect on sea level and possible variability in storm events could have released sediment into this environment.



existen evidencias de agricultura (Pilcher y Goddard 1979). Por ende, el declive final del pino puede haber sido generado por el clima y su correlación con el inicio de los desmontes de la Edad de Bronce puede ser sólo una coincidencia (Smith y Goddard 1991). Asimismo, el declive del olmo, el cual es evidente en Sluggan Bog, Condado de Antrim, en 4200 AP, también se ha correlacionado con el cambio climático (Smith y Goddard 1991). La fluctuación del clima durante ese periodo puede haber tenido un efecto sobre el nivel del mar y la posible variabilidad en los eventos de tormentas podría haber descargado sedimentos sobre este ambiente.

Hay una creciente evidencia de cambios globales grandes y significativos alrededor de este periodo (4200 AP). Los colapsos del reino de Egipto y del imperio acadio en Mesopotamia alrededor de 4200 AP están bien documentados (Cullen *et al.* 2000, Peiser *et al.* 1998) y han sido asociados con el comienzo súbito de condiciones ambientales más áridas (Weiss *et al.* 1993). Se ha identificado una asociación entre el colapso del “viejo mundo” y un cambio en la precipitación pluvial en varias partes del mundo (Dalfes *et al.* 1997). Los pueblos nómadas de Asia, África y Europa oriental enfrentaron entonces una crisis y sus civilizaciones se colapsaron (Peiser 1998).

Más localmente también existe evidencia de cambios climáticos alrededor de este periodo, así como de fluctuaciones del nivel del mar. La erupción volcánica Hekla 4 (Islandia) de 4300 AP se utiliza para datar muchos eventos alrededor de este periodo mediante la identificación de tefra. El isócrono de Hekla 4 muestra sincronía con un incremento substancial en el nivel del Lago Neagh en Irlanda del Norte alrededor de 2300 AC (Plunkett *et al.* 2004). También es consistente con una anomalía en el registro dendrocronológico del roble irlandés (Baillie 1995). Langdon y Barber (2001), Mauquoy y Barber (2002) y Barber *et al.* (2003) registraron cambios climáticos en las Islas Británicas, que son contemporáneos con Hekla 4. Mucha de la literatura científica que muestra un cambio climático durante este periodo es de publicación reciente e indica que la aceptación de este fenómeno aumenta conforme se acumulan las evidencias (e.g., Plunkett *et al.* 2004).

El declive del banco de *maerl* coincidió con un aumento del nivel del mar entre 6000 y 3500 AP, cuando el nivel del mar mundial posiblemente se encontraba 4 m por encima del nivel actual (Carter *et al.* 1987). La bahía de Dublín y Strangford Lough, así como otros sitios, proporcionan clara evidencia de que alrededor de 5000 AP hubo una transgresión eustática (aumento en el nivel del mar) hasta un nivel de 3.5 m por encima del nivel del mar moderno (Mitchell y Stephens 1974). Excepto en el extremo noreste de Irlanda, esta transgresión probablemente fue responsable de la creación de la mayoría de las playas elevadas del Holoceno en este país. Aunque los depósitos de *maerl* en el sitio de Sketrick son sublitorales, es posible que existan depósitos por debajo de las playas elevadas, las cuales se encuentran unos cuantos metros por encima de la marca de pleamar actual.

Conforme cambia el nivel del mar también cambia el aporte de sedimentos, y un creciente nivel del mar puede

There is growing evidence of large and significant global changes around this period at 4200 BP. The collapse of the kingdom of Egypt and the Akkadian empire in Mesopotamia around 4200 BP is now well documented (Cullen *et al.* 2000, Peiser *et al.* 1998) and in these areas it has been linked to a sudden onset of more arid conditions (Weiss *et al.* 1993). The collapse of the “old world” and an associated link with a shift in precipitation in many parts of the world has been identified (Dalfes *et al.* 1997). The nomadic peoples of Asia, Africa and Eastern Europe were then faced with crisis and their civilizations collapsed (Peiser 1998).

More locally there is evidence of climate changes around this period, combined with sea-level fluctuations. The Icelandic Hekla 4 eruption of 4300 BP is used to date many events around this period by identification of tephra. The Hekla 4 isochron is synchronous with a substantial increase in lake-level of Lough Neagh in Northern Ireland around 2300 BC (Plunkett *et al.* 2004). It is also consistent with an anomaly in the Irish Oak dendrochronology record (Baillie 1995). Langdon and Barber (2001), Mauquoy and Barber (2002) and Barber *et al.* (2003) all record climatic shifts in the British Isles, which are contemporaneous with Hekla 4. Much of the scientific literature indicating a climatic change in this period is recently published and indicates a more recent acceptance of this phenomenon as the body of evidence increases (e.g., Plunkett *et al.* 2004).

The decline of the *maerl* bed coincided with a raised sea level between 6000 and 3500 BP, when world sea level may have stood 4 m above present level (Carter *et al.* 1987). There is clear evidence from Dublin Bay and from Strangford Lough, and supporting evidence from other sites, that there was a eustatic transgression (sea-level rise) to a level about 3.5 m above modern sea level about 5000 BP (Mitchell and Stephens 1974). Except in the extreme northeast corner of Ireland, this transgression was probably responsible for most of the Holocene raised beaches in Ireland. Though the *maerl* deposits at the Sketrick Island site are sublittoral it is possible that there are also deposits below raised beaches, which are a few meters above present high water mark.

As sea level changes so does the supply of sediment, and rising sea level may cause a release of shoreline sediment. When this rise in sea level is combined with a storm event there is potential for a large amount of sediment to be released into the marine environment (Carter *et al.* 1987). This is a likely explanation of what occurred in the Sketrick Island area since, although sea-level rise may have been gradual, when combined with a large storm event a substantial sediment load could have been eroded from the mainland and the drumlin islands. Drumlins have been the focus of research because they act as focal points of erosion and as primary sources of new sediment into a coastal system (Carter *et al.* 1989). As Rainey and Sketrick Islands are drumlins they could be the source of the weathered material that buried the *maerl* bed. Strangford Lough is a sheltered environment with low wave energy, but it can still be exposed to extreme events by strong winds and low



originar una liberación de sedimentos costeros. Cuando este aumento en el nivel del mar se combina con un evento de tormenta existe la posibilidad de que se libere una gran cantidad de sedimentos al medio marino (Carter *et al.* 1987). Esta es una probable explicación de lo que sucedió en la isla de Sketrick, ya que a pesar de que el aumento del nivel del mar pudo haber sido gradual, en combinación con un evento de tormenta grande es posible que se haya erosionado una carga importante de sedimentos de tierra firme y de las islas formadas por colinas ovaladas y alargadas llamadas *drumlins*. Tales formaciones han sido estudiadas porque actúan como puntos focales de erosión y como fuentes principales de sedimentos nuevos para el sistema costero (Carter *et al.* 1989). Como las islas de Rainey y Sketrick son de este tipo, pueden haber sido las fuentes del material intemperizado que sepultó el banco de *maerl*. A pesar de que Strangford Lough es un ambiente protegido con oleaje suave, puede quedar expuesto a eventos extremos de fuertes vientos y baja presión atmosférica, que en combinación con las pleamares de mareas vivas pueden dar origen a olas fuertes con gran poder de erosión (Greenwood 1998).

Kirby (1989) indicó que el nivel del mar en Strangford Lough subió rápidamente entre ~10,000 y 5,000 años AP. Desde entonces el nivel del mar se estabilizó y el fiordo quedó sujeto a la influencia de los vientos dominantes del suroeste. Estos vientos generan olas que han erosionado y aplanado los *drumlins*, y se piensa que los sedimentos resultantes fueron dispersados por las fuertes corrientes de marea. Varios *drumlins* en medio del fiordo presentan terrazas cortadas por olas resultantes de los vientos del suroeste. Durante o antes de esta erosión profunda y extensa, la bahía de Ardmillan, adyacente a la isla de Mahee al norte de Sketrick, era una zona de depositación de “arcilla azul de grano fino y con textura mantecosa” (McErlean *et al.* 2002). Esta arcilla de *Scrobicularia* (Mollusca, Bivalvia) se encuentra en varias sucesiones lagunares y estuarinas del Holoceno (Flandrian) en el Reino Unido, y en Strangford Lough su edad probablemente sea de varios miles de años (McErlean *et al.* 2002). La arcilla que cubre los rodolitos subfósiles coincide con esta descripción. Alternativamente, el depósito podría consistir de arcilla azul estuarina, que se encuentra en otras zonas del fiordo, depositada por el tiempo en que el mar alcanzó su nivel máximo c. 4000–5000 AP (T. McErlean com. pers.). A pesar de que este depósito de sedimentos podría ser de una de dos fuentes que no han sido asociadas a fechas precisas, ambos eventos podrían haber causado la depositación durante un periodo que coincide con nuestro fechado con carbono radioactivo de la extinción del depósito enterrado de *maerl*.

Ryan y Cooper (1998) determinaron que no se ha encontrado evidencia de sedimento externo en Strangford Lough durante el Holoceno. Asimismo, el aporte de sedimentos de los ríos que desembocan en el fiordo es insignificante; por tanto, aparentemente durante el Holoceno los sedimentos en el fiordo fueron originados por erosión dentro del mismo fiordo o por la redistribución de depósitos glaciales y marinos (Ryan y Cooper 1998).

atmospheric pressure, which when superimposed on high spring tides can produce significantly powerful waves for erosion (Greenwood 1998).

Kirby (1989) records that sea level in Strangford Lough rose rapidly between about 10,000 and 5,000 years BP. After this time sea level stabilized and the lough was regularly under the influence of the prevailing southwesterly winds. These winds have caused waves that have planed off the drumlins, and it is thought that the resulting sediments would have been dispersed by the strong tidal currents. Many drumlins in the centre of the lough have wave-cut platforms resulting from the southwesterly winds. Prior to or during this deep and extensive erosion, Ardmillan Bay, adjacent to Mahee Island north of Sketrick, was an area of deposition of “fine-grained, buttery-textured blue clay” (McErlean *et al.* 2002). This *Scrobicularia* (Mollusca, Bivalvia) clay occurs in many Flandrian lagoonal and estuarine successions in the United Kingdom, and in Strangford Lough its age is probably several thousand years (McErlean *et al.* 2002). The clay that encases the subfossil maerl matches this description. Alternatively, the deposit could be blue estuarine clay, present in other areas of the lough, deposited around the time of the sea level maximum or highstand c. 4000–5000 BP (T. McErlean pers. comm.). Though this sediment deposition could be from one of two sources that do not have precise associated dates, both of the events are likely to have caused the deposition during a period which coincides with our radiocarbon dating of the death of the buried maerl deposit.

Ryan and Cooper (1998) determined that over the Holocene period there is no evidence of external sediment in Strangford Lough. Also, the sediment supply from the rivers that entered the lough is negligible; therefore, the Holocene sediments in the lough appear to be derived internally from erosion and redistribution of glacial and marine deposits (Ryan and Cooper 1998).

The subfossil maerl extends between Rainey and Sketrick Islands, through the channel with the mainland to between Rainey and Mahee Islands, and south to Ringhaddy. At Sketrick the subfossil maerl is now being washed out of the sediment due to high currents that have been increased by construction of causeways. The causeways to Mahee Island were constructed relatively recently at the end of the 19th century. Previous to this there would have been three exits for tide where there is now one, causing amplified tidal streams and erosion of the sea bed (Blake 2001). An enclosed area and confined site could be susceptible to accentuated astronomical surge tides and geomorphological changes, such as construction of barriers (Carter 1982). The causeway construction has altered the area sufficiently to cause erosion of a maerl bed, which was previously buried for around 4000 years BP. There is archaeological evidence of oyster exploitation from shell middens in the area around Sketrick at approximately 4200 BP (T. McErlean pers. comm.), and the possibility of human settlement causing sedimentation of the maerl bed at Sketrick must also be considered.

El banco de *maerl* subfósil se extiende de entre las islas de Rainey y Sketrick, por el canal hasta entre las islas de Rainey y Mahee, y hacia el sur hasta Ringhaddy. En Sketrick los rodolitos subfósiles están siendo desenterrados del sedimento debido a fuertes corrientes que han aumentado por la construcción de carreteras. Las carreteras a la isla de Mahee fueron construidas hace relativamente poco, a finales del siglo XIX. Antes de su construcción existían tres salidas para la marea en vez de la única que actualmente hay, y que ocasiona mayores flujos de marea y erosión del fondo del mar (Blake 2001). Un área encerrada o un sitio confinado podrían ser susceptibles a mareas astronómicas acentuadas y cambios geomorfológicos como la construcción de barreras (Carter 1982). La construcción de carreteras entre islas ha modificado el área lo suficiente para causar la erosión de un banco de *maerl* que había estado enterrado durante unos 4000 años AP. Los conchales en las inmediaciones de Sketrick proporcionan evidencia arqueológica de la explotación de ostiones durante aproximadamente 4200 AP (T. McErlean com. pers.), y también debería de considerarse la posibilidad de que el asentamiento humano haya provocado la sedimentación del banco de *maerl* en Sketrick.

En resumen, la evidencia sugiere que el banco de *maerl* en Sketrick quedó sepultado alrededor de 4150 AP debido a que fue cubierto por sedimentos cuya fuente pudo haber sido el depósito de arcilla de *Scrobicularia* o arcilla azul estuarina alrededor de su periodo de extinción, en asociación con un nivel del mar máximo. Las formas de crecimiento de los talos de *maerl* indican que el flujo de corrientes en la zona era menos intenso que en tiempos modernos (Blake 2005). El cambio en el flujo de mareas puede deberse a la construcción de carreteras entre las islas circundantes, lo que también ha provocado que los rodolitos enterrados queden expuestos fuera del sedimento. De este estudio también se puede concluir que el banco de *maerl* fósil se extiende más allá de lo que se había determinado anteriormente y que podría haber sido extenso alrededor de los *drumlins* de la costa occidental de Strangford Lough, y que la extinción del banco puede no estar asociado con la construcción de carreteras entre las islas.

#### *Belfast Lough, Irlanda del Norte*

Las fechas obtenidas para el sitio mediante AMS indican que la extinción del banco de *maerl* sucedió en algún momento después de 1809 AD (tabla 2). La proximidad de estas dos fechas puede indicar que hubo un “evento de extinción” en este banco. Por el intervalo de edad obtenido se pueden excluir algunas posibles causas de la extinción. Tal extinción ocurrió después de la gran explosión demográfica de Belfast a partir de 1790. El fechado también indica que el banco de *maerl* ya estaba muerto cuando se construyó la central eléctrica de Kilroot durante los años de 1980, y no se observa enriquecimiento en la muestra atribuible a la planta nuclear de Sellafield en Cumbria, Inglaterra, que comenzó a reprocesar combustible en 1952. Aunque no se puede determinar un intervalo de edad más preciso debido al efecto de la calibración en este periodo

In summary, the evidence suggests that the *maerl* bed at Sketrick was smothered around 4150 BP by burial in sediment. The source of this could be *Scrobicularia* clay or blue estuarine clay deposited around the extinction period, and is likely to have been associated with a sea-level highstand. The growth forms of the *maerl* thalli imply that current flow in that area was not as strong as in modern times (Blake 2005). The change in current flow may be due to construction of causeways around surrounding islands, which have also caused the buried *maerl* to be exposed from the sediment. We can also conclude from this study that the fossil *maerl* extends further than was previously determined and may have been extensive around the *drumlins* of the western shore of Strangford Lough, and that the death of the *maerl* may not be connected to the causeway construction.

#### *Belfast Lough, Northern Ireland*

The AMS dates for the site indicate that the *maerl* bed demise was some time after 1809 AD (table 2). The proximity of the two AMS dates may be an indicator that there was an “extinction event” in this *maerl* bed. From the age range measured we can exclude some possible causes of the extinction. The *maerl* bed demise occurred after the large population explosion of Belfast from the 1790s. The dating also indicates that the *maerl* bed was already dead by the time the Kilroot power station was constructed in the 1980s, and there is no enrichment in the sample from the Sellafield nuclear reprocessing site in Cumbria, England, which began fuel reprocessing in 1952. Though a narrower range of age is not possible due to the effect of calibration in this time period, there is some likelihood that the demise occurred in the 1840s. When combined with our experimental evidence indicating that the *maerl* could be killed by sedimentation, the radiocarbon dates support our hypothesis that the channel dredging in Belfast Harbour around this time could have caused the death of the *maerl* bed. This channel dredging was extensive and would have caused a great deal of fine-grained sediment to be remobilized within the lough.

#### **Conclusions**

*Maerl* will grow and develop into dense habitats where the conditions are suitable, though this occurs over a long time frame. In the past environments of Strangford Lough and Belfast Lough there were larger deposits of *maerl* than are present today.

Other sites show comparisons with the area examined in this study. The stabilization of environmental conditions was responsible for the formation and establishment of a coralline algal framework around 2340 BP in the Bay of Morlaix, northern Brittany (Wehrmann 1998). Also of note are the historic records of sedimentation of *maerl* beds. On the north shore of Marseilles’ Lacydon, a biological crisis was linked to human settlement at around  $3860 \pm 130$  BP. Siltation of the

de tiempo, hay cierta probabilidad de que la extinción haya ocurrido durante la década de 1840. En combinación con nuestra evidencia experimental que indica que los rodolitos pueden morir por sedimentación, las fechas de carbono radiactivo sustentan nuestra hipótesis de que el dragado del canal en el puerto de Belfast por ese tiempo puede haber causado la extinción del banco de *maerl*. Este dragado fue extensivo y hubiera generado la remobilización dentro del fiordo de una gran cantidad de sedimento de grano fino.

## Conclusiones

En condiciones adecuadas los rodolitos crecerán y producirán hábitats densos, aunque esto sucede en largos periodos de tiempo. En antiguos ambientes de Strangford Lough y Belfast Lough existieron depósitos de *maerl* mayores que los actuales.

Existen otros sitios comparables con nuestra área de estudio. La estabilización de las condiciones ambientales dio origen a la formación y desarrollo de una estructura de algas coralinas alrededor de 2340 AP en la bahía de Morlaix, en el norte de Bretaña, en Francia (Wehrmann 1998). También son de interés los registros históricos de la sedimentación de bancos de *maerl*. En la costa norte de la cala de Lacydon en Marsella, se asoció una crisis biológica con el asentamiento humano alrededor de  $3860 \pm 130$  AP. El encenagamiento de los rodolitos por bioacumulación debido al aprovechamiento de ostiones detuvo su crecimiento, lo cual es un impacto antropogénico directo, no un proceso natural (Morhange *et al.* 1996). Los registros arqueológicos de conchales en las inmediaciones de Sketrick alrededor de 4200 AP muestran evidencia de la explotación de ostiones (T. McErlean com. pers.). A pesar de que el banco cubre una área grande, no se puede eliminar la posibilidad de que la sedimentación del banco de *maerl* en Sketrick sea resultado del asentamiento humano. Con base en el fechado con carbono radiactivo y la extensión del banco, es evidente que su extinción no es resultado de la construcción de carreteras, aunque éstas pueden ser responsables del creciente flujo en los canales y de la erosión del sedimento que los ha descubierto. En algunas zonas de Strangford Lough se han reestablecido los rodolitos, aunque ahora se trata de una especie de aguas más cálidas (*P. calcareum*); sin embargo, no se ha dado la acumulación de depósitos de *maerl* que se observa en el registro subfósil.

La sedimentación ha jugado un papel en la extinción de los bancos de *maerl* de Belfast Lough y Strangford Lough. Este trabajo muestra que el fechado con carbono radiactivo de los hábitats rodolíticos puede utilizarse para verificar con precisión cuando sucedió la extinción de un banco de *maerl*. Se puede formular una hipótesis sobre la causa de la extinción usando datos históricos y demás evidencias ambientales. La información obtenida puede ser de utilidad para la conservación y el manejo de estos hábitats. El estudio de caso de Belfast Lough resalta la amenaza moderna que representa para los bancos de *maerl* la sedimentación producida por el dragado de canales, lo cual complementa trabajo experimental previo.

*maerl* due to bioaccumulation from the exploitation of oysters led to a halt in *maerl* growth; a direct anthropogenic impact, not natural processes (Morhange *et al.* 1996). There is evidence from the archaeological record of oyster exploitation from middens in the area around Sketrick at approximately 4200 BP (T. McErlean pers. comm.). The possibility of human settlement causing sedimentation of the *maerl* bed at Sketrick cannot be ruled out, though the *maerl* covers a large area. From radiocarbon dating, and the extent of the bed, it is clear that it was not killed by the construction of causeways, though these may be responsible for increased flow in the channels and erosion of the sediment to expose the deposits. In some areas of Strangford Lough *maerl* has re-established, though it is now primarily a warmer water species (*P. calcareum*), but there has not been the accumulation of *maerl* deposits that can be observed in the subfossil record.

Sedimentation is implicated in the death of the Belfast Lough and Strangford Lough *maerl* beds. This research has shown that radiocarbon dating of *maerl* bed habitats can be used to accurately verify when a past *maerl* bed has died. The cause of death can be hypothesized by using historical data and other environmental evidence. The information yielded can then be used to inform conservation management on protection of these habitats. The case study of Belfast Lough highlights the modern threat to *maerl* bed by sedimentation caused by channel dredging, which complements previous experimental work.

## Acknowledgements

We gratefully acknowledge the Department of Agriculture and Rural Development for Northern Ireland (DARDNI) for *maerl* collection in Belfast Lough. Radiocarbon dating was funded by NERC grants 967.0402 and 15.47. We thank the two anonymous reviewers for constructive comments that improved this manuscript.

## Agradecimientos

Agradecemos al Departamento de Agricultura y Desarrollo Rural de Irlanda del Norte su apoyo para la recolección de rodolitos en Belfast Lough. El fechado con carbono radiactivo fue financiado por NERC (proyectos 967.0402 y 15.47). Se agradece a los dos revisores anónimos cuyos constructivos comentarios mejoraron este trabajo.

Traducido al español por Christine Harris.

## Referencias

- Baillie MGL. 1995. Dendrochronology and the chronology of the Irish Bronze Age. In: Wadell J and Shee Twohig E (eds.), Ireland in the Bronze Age. The Stationery Office, Dublin, pp. 30–37.
- Barber KE, Chambers FM, Maddy D. 2003. Holocene palaeoclimates from peat stratigraphy: Macrofossil proxy climate records from

- three oceanic raised bogs in England and Ireland. *Quat. Sci. Rev.* 22: 521–539.
- Basso D, Tomaselli V. 1994. Palaeoecological potentiality of rhodoliths: A Mediterranean case history. In: Matteucci R *et al.* (eds.), *Studies on Ecology and Paleocology of Benthic Communities*. Boll. Soc. Paleontol. Ital., Mucchi, Modena. Spec. Vol. 2, pp. 17–27.
- Birkett DA, Maggs C, Dring MJ. 1998. Maerl (Vol. V). An overview of dynamics and sensitivity characteristics for conservation management for marine SACs. Scottish Association for Marine Science.
- Blake C. 2001. Investigation of the maerl bed at Sketrick Island, Strangford Lough, with determination of growth rates of maerl species. M. Res. thesis, Queen's University Belfast.
- Blake CB. 2005. Use of maerl as a biogenic archive. Ph.D. thesis, Biological Sciences, Queen's University Belfast.
- Blake CB and Maggs CA. 2003. Comparative growth rates and internal banding periodicity of maerl species (Corallinales, Rhodophyta) from northern Europe. *Phycologia* 42: 606–612.
- Bosence DWJ. 1976. Coralline Algae: Mineralization, Taxonomy and Palaeoecology. In: Riding R (ed.), *Calcareous Algae and Stromatolites*. Springer-Verlag.
- Bosence DWJ. 1983. Coralline algal frameworks. *J. Geol. Soc. Lond.* 140: 365–376.
- Bosence D, Wilson J. 2003. Maerl growth, carbonate production rates and accumulation rates in the northeast Atlantic. *Aquat. Conserv.* 13: S21–S31.
- Boyd WE. 1985. Fossil *Lithothamnium* (calcareous algae) rhodoliths from Late Quaternary raised coastal sediments, Irvine, Ayrshire. *Scott. J. Geol.* 22: 165–177.
- Carter RWG. 1982. Sea-level changes in Northern Ireland. *Proc. Geol. Assoc.* 93: 7–23.
- Carter RWG, Johnston TW, McKenna J, Orford JD. 1987. Sea-level, sediment supply and coastal changes: Examples from the coast of Ireland. *Prog. Oceanogr.* 18: 79–101.
- Carter RWG, Devoy RJW, Shaw J. 1989. Late Holocene sea-level changes in Ireland. *J. Quat. Sci.* 4: 7–23.
- Cintra-Buenrostro CE, Foster MS, Meldahl KH. 2002. Response of nearshore marine assemblages to global change: A comparison of molluscan assemblages in Pleistocene and modern rhodolith beds in the southwestern Gulf of California, Mexico. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* 183: 299–320.
- Cullen HM, deMenocal PB, Hemming S, Hemming G, Brown FH, Guilderson T, Sirocko F. 2000. Climate change and the collapse of the Akkadian empire: Evidence from the deep sea. *Geology* 28: 379–382.
- Dalfes N, Kukla G, Weiss H. (eds.). 1997. Third millennium BC climate change and Old World collapse. NATO ASI Ser. 1, Vol. 49.
- Foster MS. 2001. Rhodoliths: Between rocks and soft places. *J. Phycol.* 37: 659–667.
- Freiwald A, Henrich R, Schafer P, Willkomm K. 1991. The significance of high-boreal subarctic maerl deposits in northern Norway to reconstruct Holocene climatic changes and sea-level oscillations. *Facies* 25: 315–340.
- Greenwood RO. 1998. Patterns and processes of erosion along the drumlin coast of Strangford Lough. M.Phil. thesis, Queen's University Belfast.
- Halfar J, Godinez-Orta L, Ingle JJC. 2000. Microfacies analysis of recent carbonate environments in the southern Gulf of California, Mexico: A model for warm-temperature to subtropical carbonate formation. *Palaios* 15: 323–342.
- Hall-Spencer JM, Moore PG. 2000. Scallop dredging has profound, long-term impacts on maerl habitats. *ICES J. Mar. Sci.* 57: 1407–1415.
- Hughen KA, Baillie ML, Bard E, Beck JW, Bertrand CJH, Blackwell PG, Buck CE, Burr GS, Cutler KB, Damon PE, Edwards RL, Fairbanks FG, Friedrich M, Guilderson TP, Kromer B, McCormac G, Manning S, Ramsey CB, Reimer PJ, Reimer RW, Remmele S, Southon JR, Stuiver M, Talamo S, Taylor FW, van der Plicht J, Weyhenmeyer CE. 2004. Marine04 marine radiocarbon age calibration, 0–26 cal kyr BP. *Radiocarbon* 46: 1059–1086.
- Johnson T, Hensman R. 1896. Algae from the north side of Belfast Lough. *Irish Nat. J.* 5: 252–253.
- Kamenos NA, Moore PG, Hall-Spencer JM. 2003. Substratum heterogeneity of dredged vs undredged maerl grounds. *J. Mar. Biol. Assoc. UK* 83: 411–413.
- Kamenos NA, Moore PG, Hall-Spencer JM. 2004. Small-scale distribution of juvenile gadoids in shallow inshore waters; what role does maerl play? *ICES J. Mar. Sci.* 61: 422–429.
- Keegan BF. 1974. The macrofauna of maerl substrates on the west coast of Ireland. *Cah. Biol. Mar.* 15: 513–530.
- Kirby R. 1989. Tidal flat instability and fine-grained sediment transport at Ardmillan Bay, Strangford Lough, in relation to *Spartina* eradication and oyster trestle burial. Ravensrodd Consultants Ltd.
- Langdon PG, Barber KE. 2001. New Holocene tephra and a proxy climate record, from a blanket mire in northern Skye, Scotland. *J. Quat. Sci.* 16: 753–759.
- Mauquoy D, Barber K. 2002. Testing the sensitivity of the palaeoclimatic signal from ombrotrophic peat bogs in northern England and the Scottish Borders. *Rev. Palaeobot. Palynol.* 119: 219–240.
- McCormack E. 2006. *Carraroenia ruthae* gen. et sp. nov. (Copepoda, Harpacticoida, Laophontidae) from maerl substrates of the Irish west coast. *Zootaxa* 1202: 39–52.
- McErlean T, McConkey R, Forsythe W. 2002. Strangford Lough, An Archaeological Survey of the Maritime Cultural Landscape. Blackstaff Press Ltd., Belfast.
- Mitchell GF, Stephens N. 1974. Is there evidence for a Holocene sea-level higher than that of today on the coast of Ireland? *Colloq. Int. Cent. Nat. Rech. Sci.* 219: 115–125.
- Morhange C, Hesnard A, Bourcier MAP, Carbonel P, Laborel J, Lafont R, Provansal M, Weydert P. 1996. Anthropisation, marine sedimentation and morphogenesis on the north shore of Marseilles' Lacydon since Neolithic (J Verne excavation). *Z. Geomorphol.* 40: 71–84.
- Owen DJ. 1917. A Short History of the Port of Belfast. Mayne, Boyd and Son Ltd., Belfast.
- Peiser BJ, Palmer T, Bailey ME (eds.). 1998. Natural Catastrophes during the Bronze Age Civilisations. BAR Int. Ser. 728. Archaeopress, Oxford.
- Pilcher JR, Goddard AG. 1979. Palaeoecological investigations at Ballynagilly, a Neolithic and Bronze Age settlement in County Tyrone, Northern Ireland. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. (B Biol. Sci.)* 286.
- Plunkett GM, Whitehouse NJ, Hall VA, Brown DM, Baillie MGL. 2004. A precisely-dated lake-level rise marked by diatomite formation in northeastern Ireland. *J. Quat. Sci.* 19: 3–7.
- Rafter TA, Grant-Taylor T. (eds.) 1972. Proceedings of the 8th International Conference on Radiocarbon Dating. Royal Society of New Zealand, New Zealand, p. 1.
- Ryan NM, Cooper JAG. 1998. Spatial variability of tidal flats in response to wave exposure: Examples from Strangford Lough, Co. Down, Northern Ireland. In: Black KS, Paterson DM, Cramp A (eds.), *Sedimentary Processes in the Intertidal Zone*. Spec. Publ. Geol. Soc. Lond., Vol. 139, pp. 221–230.
- Sartoretto S, Verlaque M, Laborel J. 1996. Age settlement and accumulation rate of submarine "coralligene" (–10 to –60m) of

- the northwestern Mediterranean Sea; relation to Holocene rise in sea level. *Mar. Geol.* 130: 317–331.
- Scoffin TP. 1988. The environments of production and deposition of calcareous sediments on the shelf west of Scotland. *Sediment. Geol.* 60: 107–124.
- Smith AG, Goddard IC. 1991. A 12500 year record of vegetational history at Sluggan Bog, Co. Antrim, N. Ireland (incorporating a pollen zone scheme for the non-specialist). *New Phytol.* 118: 167–187.
- Steller DL, Riosmena-Rodríguez R, Foster MS, Roberts CA. 2003. Rhodolith bed diversity in the Gulf of California; the importance of rhodolith structure and consequences of disturbance. *Aquat. Conserv.* 13: S5–S20.
- Stuiver M, Polach HA. 1977. Discussion: Reporting of  $^{14}\text{C}$  data. *Radiocarbon* 19: 355–363.
- Waddell J. 2000. *The Prehistoric Archaeology of Ireland*. Wordwell, Bray.
- Wehrmann A. 1998. Modern cool-water carbonates on a coastal platform of northern Brittany, France: Carbonate production in macrophytic systems and sedimentary dynamics of bioclastic facies. *Senckenb. Marit.* 28: 151–166.
- Weidman CR, Jones GA. 1993. A shell-derived time history of bomb C-14 on Georges Bank and its Labrador Sea implications. *J. Geophys. Res. (Oceans)* 98: 14577–14588.
- Weiss H, Courty MA, Wetterstrom W, Guichard F, Senior L, Meadow R, Curnow A. 1993. The genesis and collapse of third millennium North Mesopotamian civilization. *Science* 26: 995–1004.
- Wilson S, Blake C, Berges JA, Maggs CA. 2004. Environmental tolerances of free-living coralline algae (maerl): Implications for European marine conservation. *Biol. Conserv.* 120: 279–289.

*Recibido en diciembre de 2006;  
aceptado en julio de 2007.*