

TRABAJOS ORIGINALES

La transformación ambiental reciente de la Ría de Bilbao: indicadores micropaleontológicos en el registro sedimentario estuarino

Alejandro Cearreta* y Eduardo Leorri

Departamento de Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencias, Universidad del País Vasco/E.H.U., Apartado 644, 48080 Bilbao.<gppcebia@lg.ehu.es> y <gpblesoe@lg.ehu.es>

*Autor al que se le dirige la correspondencia

Cearreta, A. y E. Leorri, 2000. La transformación ambiental reciente de la Ría de Bilbao: indicadores micropaleontológicos en el registro sedimentario estuarino. *Naturalia Cantabrica* 1: 21-31.

Resumen: Se ha analizado el contenido en foraminíferos bentónicos de los sedimentos superficiales y pequeños testigos obtenidos en la Ría de Bilbao con el fin de caracterizar históricamente la respuesta biológica al impacto antrópico reciente en este estuario. La presencia esporádica de pequeñas cantidades de foraminíferos transportados desde la bahía sugieren una transformación ambiental muy intensa y persistente de este medio litoral debido a los vertidos industriales y urbanos efectuados durante los últimos 150 años. La comparación de estos datos con la información micropaleontológica contenida en sondeos holocenos ha permitido determinar las condiciones estuarinas pre-industriales y establecer una base de referencia para evaluar el resultado de la futura regeneración ambiental de la Ría de Bilbao.

Palabras clave: foraminíferos bentónicos; registro sedimentario; transformación ambiental; Ría de Bilbao.

Cearreta, A. and E. Leorri, 2000. Recent environmental change in the Bilbao estuary: micropalaeontological indicators in the estuarine sedimentary record. *Naturalia Cantabrica* 1: 21-31.

Abstract: Benthonic foraminiferal content in surface sediments and short cores from the Bilbao Estuary have been analyzed in order to characterize the biological response to the recent anthropogenic impact in this estuary. The rare presence of small numbers of foraminifera transported from the bay into the estuary suggest a very intense and persistent environmental transformation of this coastal area due to industrial and urban effluents discharged during the last 150 years. Comparison of these data with micropalaeontological information obtained from Holocene boreholes has enabled the recognition of pre-industrial estuarine environmental conditions in the estuary and the establishment of a reference baseline to evaluate the effectiveness of the future environmental regeneration in the Bilbao Estuary.

Key words: benthonic foraminifera; sedimentary record; environmental change; Bilbao Estuary

1. Introducción

La Ría de Bilbao originalmente representaba el medio estuarino más extenso del Cantábrico (Hazera, 1968). Actualmente, este estuario presenta 15 km de longitud y está formado por la zona mareal del río Nervión, aunque cuatro afluentes (Kadagua, Asua, Galindo y Gobelas) descargan dentro de la propia ría. (Fig. 1). El canal mareal desemboca en una amplia bahía denominada El Abra (anchura media 3,5 km; hasta 30 m de profundidad). Las características naturales de la Ría de Bilbao han sido dramáticamente modificadas por un asentamiento urbano, industrial y portuario que ha ocupado prácticamente todo el valle como resultado de la transformación económica de la Villa de Bilbao. Gracias al abundante mineral de hierro presente en las rocas cercanas, Bilbao se transformó, partiendo de un pequeño núcleo comercial situado en la cabecera del estuario, en una enorme ciudad industrial desarrollada a lo largo de toda la ría desde mediados del siglo XIX. En consecuencia, ya en 1885 el estuario original estaba completamente reducido a un

mero canal mareal (anchura media 100 m; menos de 10 m de profundidad) aislado mediante encauzamientos de sus dominios intermareales originales con el fin de permitir una vía navegable desde la Villa hasta el mar abierto (Cearreta, 1992). Durante los últimos 150 años, la Ría de Bilbao ha sido utilizada como depósito de los lavados de mineral, los residuos industriales y los vertidos urbanos que han acabado convirtiendo esta zona en una auténtica «cloaca navegable». Hoy en día, sus aguas y sedimentos presentan unas concentraciones extremadamente bajas en oxígeno disuelto y un contenido elevado en materia orgánica y metales pesados (Irabien, 1993; Sáiz-Salinas *et al.*, 1996), convirtiendo a este estuario en la zona costera más contaminada del Cantábrico.

El principal objetivo de este estudio es la evaluación del significado ambiental de los datos sobre foraminíferos bentónicos obtenidos en muestras superficiales y pequeños testigos recogidos en las llanuras intermareales altamente contaminadas, con el fin de reconstruir la historia reciente de la influencia antrópica sobre la Ría de Bilbao tal y como aparece registrada en sus sedimentos.



Fig. 1. Localización geográfica de la Ría de Bilbao, mostrando la posición de las muestras superficiales, los pequeños testigos, y las localidades mencionadas en el texto.

Fig. 1. Geographical location of the Bilbao estuary showing the position of the surface samples, short cores and localities mentioned in the text.

La reconstrucción completa del ecosistema pre-industrial a partir de los sedimentos estuarinos fósiles generalmente no es posible debido a que la mayor parte de los organismos no se preservan en los sedimentos a lo largo del tiempo. Sin embargo, sí es posible realizar interpretaciones de este tipo utilizando aquellos organismos que presentan un buen potencial de preservación, como por ejemplo los foraminíferos (Alve, 1991b). Además, los datos obtenidos pueden constituir una referencia adecuada para la futura evaluación de los resultados de la política ambiental propuesta para esta zona por las autoridades locales (Bilbao Metrópoli-30, 1998).

2. Entorno ambiental

No es fácil encontrar una explotación humana tan intensa de un recurso natural como la que ha tenido lugar en la Ría de Bilbao. Hoy se trata de una creación artificial que se asemeja muy poco al estuario original. La Ría ha sido reducida a un canal mareal encauzado que no sigue su curso natural, sus sedimentos son continuamente dragados, y todos sus dominios inter/supramareales han sido ocupados fundamentalmente con asentamientos industriales (García-Merino, 1987). Se calcula que la cantidad total de superficie estuarina original perdida por la ocupación humana asciende a 1000 ha (Rivas, 1991). De este modo, la Ría de Bilbao actual es un medio estuarino de pequeñas dimensiones, con una superficie total de 150 ha, una longitud de 15 km, una anchura media de 100 m, y una profundidad que varía desde 2 m en el estuario superior hasta 9 m en la desembocadura. Las mareas son semidiurnas con amplitudes que oscilan desde 4,6 m en mareas vivas hasta 1,2 m durante las mareas muertas. Se trata de un estuario parcialmente mezclado donde la contribución media de agua dulce procedente de los distintos ríos que desembocan en él se ha calculado en 25 l/s, mientras que la cantidad media de agua marina que entra dentro del sistema ha sido estimada en 230 l/s (Urrutia, 1986). Durante la pleamar la salinidad oscila entre 10‰ en la parte superior del estuario y 34 ‰ en la parte más inferior del estuario (Consortio de Aguas, 1989). Desde el punto de vista geológico, la litología que rodea la Ría consiste en una variedad de rocas sedimentarias (calizas, areniscas y margas) fundamentalmente de edad cretácica, y menas de hierro que aparecen junto a las orillas en la zona superior del estuario.

Gracias precisamente a la existencia de estos depósitos enriquecidos en hierro junto a la Ría, la primera industria de hierro y acero fue construida en la zona media del estuario sobre antiguas marismas en 1854. Desde entonces, la explotación masiva de las minas de hierro, el asentamiento de una gran variedad de actividades industriales contaminantes (principalmente relacionados con actividades de procesado de metales) sobre antiguos dominios estuarinos, y la impresionante expansión urbana alrededor del estuario, que pasó de 60.000 a un millón de personas en tan solo cien años, provocaron una dramática transformación física y química del entorno original. El canal mareal actual fue completamente canalizado e inicialmente dragado desde la Villa de Bilbao hasta el mar abierto en 1885 (Junta de Obras del Puerto, 1910), creando una vía navegable adecuada, una gran zona portuaria que incluía la longitud total de los márgenes del canal, y unas extensas zonas reclamadas que ocuparon todos los medios estuarinos originales (tales como llanu-

ras mareales, marismas, playas y dunas) para asentar actividades industriales, urbanas y agrícolas (Cearreta, 1992; 1998). Por otra parte, todos los efluentes de origen industrial y urbano fueron vertidos directamente a la Ría, provocando en las aguas y sedimentos del estuario un bajísimo contenido en oxígeno disuelto y una elevada concentración en materia orgánica y contaminantes químicos.

3. Materiales y métodos

Como consecuencia de la transformación antrópica de la Ría de Bilbao descrita anteriormente, el registro del impacto humano reciente sobre este medio puede encontrarse sólo en los sedimentos acumulados en el canal mareal. Sin embargo, es importante tener en cuenta que desgraciadamente este registro histórico estará incompleto en cualquier sitio del estuario debido a las continuas e intensas interferencias que han tenido lugar durante los últimos 150 años (dragados para mantener una vía navegable, navegación de barcos transportando materiales a lo largo del estuario, etc.)

3.1. Muestras superficiales

Se tomaron muestras superficiales, con una periodicidad estacional, para su análisis micropaleontológico en octubre 1997, enero y abril 1998 en 13 estaciones intermareales a lo largo del estuario y una localidad en la bahía (Fig. 1). Los lugares de muestreo fueron seleccionados en función de su facilidad de acceso y se limitaron a la zona intermareal más interna posible. Estos sedimentos superficiales estaban constituidos básicamente por fango negro y maloliente, excepto la muestra de la bahía que estaba formada por arena fangosa de color marrón. Se presionó un anillo de plástico en el sedimento y el centímetro más superficial dentro del mismo fue recogido y vertido en un recipiente donde se había añadido etanol. Este proceso fue repetido dos veces para obtener 80 cm² (40cm²x2) de muestra con el fin de evitar la distribución en manchas característica de los foraminíferos y poder llevar a cabo un estudio cuantitativo. En el laboratorio, el contenido del recipiente fue vertido sobre un tamiz con apertura de malla 0,063 mm y lavado con agua para eliminar la fracción fina, siguiendo las recomendaciones de Sen Gupta y Machain-Castillo (1993) debido al pequeño tamaño de las especies de foraminíferos conocidas como tolerantes a la hipoxia. Una vez limpio, el contenido del tamiz fue vertido en un cuenco de porcelana al que se añadió durante una hora una solución de Rosa de Bengala siguiendo el método definido por Walton (1952). El Rosa de Bengala tiñe el protoplasma de color rojo brillante y, en consecuencia, los organismos presuntamente vivos en el momento del muestreo pueden ser

fácilmente diferenciados de los caparzones vacíos no coloreados. Posteriormente, la muestra fue levigada de nuevo con el fin de eliminar el exceso de colorante y secada en una estufa a 60°C. Una vez seca y enfriada, la muestra fue concentrada en foraminíferos usando la técnica de flotación con tricloroetileno descrita en Murray (1979), pesada y finalmente almacenada. Este proceso fue seguido para cada una de las muestras superficiales. Debido al reducido número de foraminíferos presente en estas muestras, todos los caparzones existentes fueron recogidos y estudiados con una lupa binocular de luz reflejada. En total, fueron estudiadas 32 muestras y aproximadamente 2.000 foraminíferos.

3.2. Pequeños testigos

Con el objeto de estudiar la historia reciente de este estuario, pequeños testigos de 50 cm de longitud fueron tomados en tres zonas intermareales en noviembre 1997 (Fig. 1). Estas zonas son relativamente accesibles y se consideraron menos afectadas por los continuos dragados realizados para mantener la navegabilidad del cauce. Dos tubos de PVC (12,5 cm de diámetro) fueron presionados manualmente dentro del sedimento en cada lugar de muestreo con el fin de obtener material suficiente para analizar los siguientes parámetros: foraminíferos bentónicos, metales pesados, esteroides fecales y los radionucleidos ¹³⁷Cs y ²¹⁰Pb (cuyos datos no se presentan en este trabajo). En el laboratorio, los tubos de PVC fueron introducidos en un frigorífico a 4°C con el fin de paralizar cualquier posible actividad biológica dentro de los sedimentos. Posteriormente, los tubos fueron seccionados longitudinalmente y el sedimento dividido a intervalos de 1 cm para su análisis. Una de las cuatro mitades así obtenida fue descrita, fotografiada y radiografiada para detectar cualquier estructura interna (laminación, bioturbación), y posteriormente dividida como las otras mitades. Todas las muestras, excepto aquellas reservadas para el análisis micropaleontológico, fueron liofilizadas y almacenadas en bolsas de plástico. Los testigos no presentaban bioturbación alguna y recién seccionados mostraron un sedimento negro y maloliente finamente laminado, indicando condiciones de oxígeno muy bajas. Tras algunos minutos de exposición al aire libre el sedimento se hizo marrón con capas alternantes más oscuras y claras compuestas básicamente por fango con diferentes contenidos en arena.

Para el análisis micropaleontológico, las muestras fueron secadas en una estufa a 60°C y posteriormente pesadas. Tras ser maceradas en agua durante al menos 10 minutos, fueron lavadas a través de un tamiz de 0,063 mm, secadas y pesadas de nuevo para determinar la pro-

porción de arena y fango. Observaciones previas de la fracción arenosa de varias muestras indicaron que el contenido en foraminíferos era escaso y que éstos mostraban un buen estado de preservación sin observarse signos de piritización en los caparazones. En consecuencia, los foraminíferos fueron concentrados con tricloroetileno con el fin de ahorrar tiempo de análisis bajo la lupa. La fracción hundida fue también examinada con el fin de verificar el éxito de la flotación. Inicialmente, se tomaron muestras a intervalos fijos a lo largo de los sondeos, aproximadamente tres muestras cada 5 cm. Posteriormente, aquellos intervalos que mostraron variaciones en el contenido de foraminíferos fueron analizados a cada centímetro. Excepto un pequeño número de muestras que presentaban un abundante contenido en caparazones de foraminíferos y donde fue posible extraer al menos 300 individuos, el pequeño número de foraminíferos encontrado en la mayor parte de las muestras hizo necesario recoger en éstas todos los caparazones disponibles. En conjunto, se estudiaron 84 muestras y más de 5.600 foraminíferos en estos testigos.

4. Resultados y discusión

4.1. Muestras superficiales

Gracias al uso del Rosa de Bengala, es posible diferenciar los organismos que se suponen vivos en el momento del muestreo (formas teñidas) de aquellos que estaban muertos (caparazones no teñidos). En consecuencia, estas muestras pueden ser divididas en dos categorías. En primer lugar, las asociaciones vivas que se consideran en equilibrio con su medio y, en segundo lugar, las asociaciones muertas que han sido construídas a lo largo del tiempo y que derivan de las asociaciones vivas mediante la producción y muerte de las especies además de modificaciones post-mortem mediante transporte y destrucción de caparazones.

4.1.1. Asociaciones vivas

La abundancia puede definirse como el número de individuos vivos presente por unidad de superficie del lecho marino en cualquier momento (Murray, 1991). En la Ría de Bilbao, los valores de la abundancia (80 cm²) son extremadamente bajos en todas las estaciones y varían enormemente a lo largo del canal mareal, desde un mínimo de cero individuos en la totalidad del estuario superior en cualquier época del año hasta un máximo de 18 individuos en la zona estuarina más inferior (enero 1998) y 128 en la muestra intermareal obtenida en la bahía (enero 1998) (Fig. 2). Se puede considerar que cualquier zona estuarina está soportando en todo momento la mayor abundancia posible de foraminíferos, por lo que este

gradiente negativo en la densidad conforme entramos en el canal estuarino desde la bahía indica claramente unas condiciones ambientales muy desfavorables para que vivan y se reproduzcan las poblaciones de foraminíferos bentónicos.

En la zona superior del estuario (muestras 1-5) no se han encontrado foraminíferos vivos durante todo el período de estudio. Sin embargo, en la zona estuarina media (muestras 6-10), aunque los valores de abundancia observados fueron extremadamente bajos (desde cinco individuos en la muestra 7-abril 1998 hasta cero individuos en enero 1998), es posible detectar una aparente variación estacional. Así, se encontraron algunos individuos vivos durante el otoño y la primavera pero desaparecieron durante el invierno. Finalmente, en la zona inferior del estuario (muestras 11-13) y en la bahía (muestra 14) se encontraron pequeñas cantidades de foraminíferos viviendo a lo largo de todo el año (desde 18 individuos en la muestra 13-enero 1998 hasta cero individuos en el estuario inferior, y desde 128 individuos-enero 1998 hasta 30 individuos-abril 1998 en la bahía). Esta distribución microfaunística sugiere la existencia de una zona transicional de carácter estacional en la zona media del estuario, situada entre las peores condiciones ambientales que caracterizan al estuario superior y las condiciones menos negativas que se encuentran en el estuario inferior. Este hecho parece claramente relacionado con el efecto de dilución producido por el agua de mar que entra en el estuario (Fig. 2).

Durante el período de muestreo se encontraron 10 especies diferentes de foraminíferos bentónicos viviendo en el estuario, aunque el máximo número de especies encontradas contemporáneamente en una estación de muestreo fueron ocho. Por otro lado, la estación situada en la bahía presentó un total de 14 especies vivas diferentes pero sólo 11 de ellas se encontraron juntas en esta muestra en un mismo momento. Las especies más recurrentes encontradas en el estuario fueron *Brizalina spathulata*, *Ammonia beccarii* y *Brizalina britannica*. Sin embargo, sus especímenes aislados encontrados ocasionalmente en algunas muestras parecen sugerir que éstos han sido transportados dentro del estuario y no son capaces de reproducirse dentro del mismo. La muestra 13, más inferior, presentó la mayor abundancia y diversidad del estuario aunque no se encontraron nunca más de 18 individuos vivos de ocho especies diferentes en el mismo momento (enero 1998). Las especies más abundantes aquí, *Haynesina germanica* y *Quinqueloculina seminula*, estaban representadas por un máximo de ocho individuos, *B. spathulata* estaba presente con cuatro individuos, y el resto de las especies vivas tenían sólo uno o dos individuos.

En la bahía, la muestra 14 mostró mayor diversidad y abundancia que cualquiera de las muestras estuarinas, aunque los valores obtenidos son mucho más bajos de los que cabría esperar para un medio de este tipo en condiciones normales sin contaminación. La mayor abundancia encontrada fue de 128 individuos de 11 especies diferentes (enero 1998). Las especies más abundantes fueron *H. germanica* (máximo 92 individuos vivos-octubre 1997), *A. beccarii* (máximo 41 individuos-enero 1998), *Q. seminula* (máximo 13 individuos-enero 1998), *Cibicides lobatula* (máximo 8 individuos-enero 1998) y *Rosalina anomala* (máximo 3 individuos-enero 1998). El resto de las especies se encontraron presentes sólo con uno ó dos especímenes. Por otra parte, esta zona de

muestreo contenía todas las especies diferentes que se encontraron en las muestras estuarinas, lo que sugiere a la bahía como el área fuente para las microfauas de foraminíferos que existen en el estuario.

4.1.2. Asociaciones muertas

Tras la introducción del método de tinción con Rosa de Bengala, ha sido posible observar que en cualquier zona marina las asociaciones vivas y muertas de foraminíferos difieren entre sí en mayor o menor grado (Murray, 1991). Las posibles causas de esta diferencia pueden dividirse en dos: producción y cambios post-mortem, particularmente transporte. Las asociaciones muertas se han formado durante un cierto período de

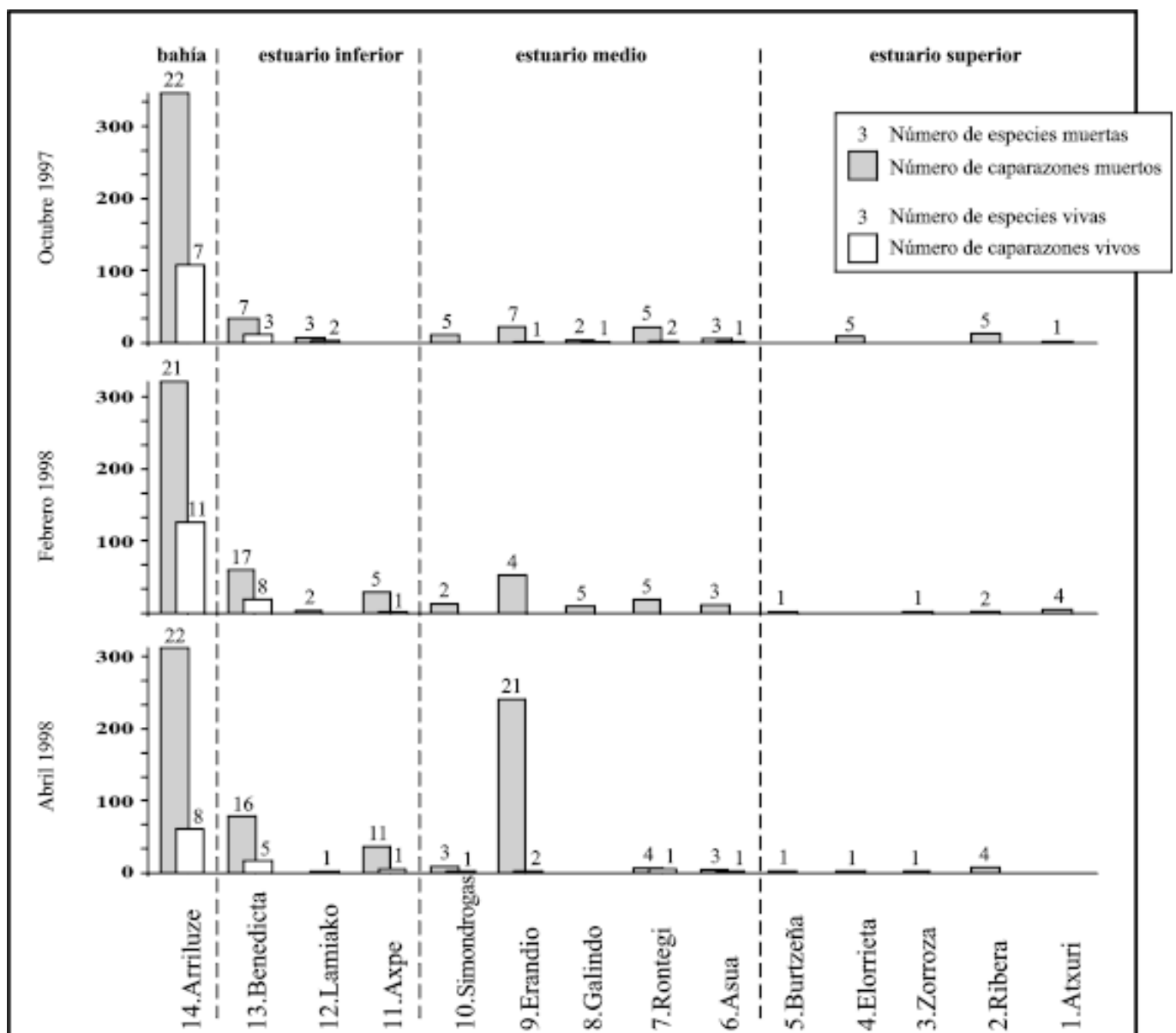


Fig. 2. Abundancia de foraminíferos vivos y muertos en las muestras de sedimento superficial a lo largo de la Ría de Bilbao.
 Fig. 2. Living and dead foraminiferal abundance in the surface sediment samples along the Bilbao Estuary.

tiempo y, en consecuencia, reflejan los efectos acumulativos de la producción anual de las diferentes especies y del transporte de caparazones. Como se ha mencionado anteriormente, el número de foraminíferos vivos en el estuario es tan escaso que puede concluirse que el transporte es la única causa posible responsable de la existencia de asociaciones muertas más abundantes que las vivas.

Se han encontrado caparazones muertos de foraminíferos en todas las muestras y a lo largo de todo el año, incluso en la muestra de la zona intermareal más superior del estuario situada a unos 15 km de la desembocadura (muestra 1), demostrando un transporte de foraminíferos muy efectivo hacia las zonas superiores del estuario, comportándose éstos como partículas de sedimento (Fig. 2). Este movimiento incluye tanto a especies pequeñas transportadas en suspensión, como *B. spathulata* y *Buliminella elegantissima*, además de caparazones robustos transportados como carga de lecho, por ejemplo *Textularia truncata* y *C. lobatula*.

Como consecuencia de este transporte dentro del estuario y de la contribución acumulativa a lo largo del tiempo de diferentes especies, las asociaciones muertas contienen más especímenes y presentan también una mayor diversidad que las asociaciones vivas. El número medio de especies muertas por muestra en el estuario es de cuatro, mientras que la diversidad media de las asociaciones vivas es menor de uno. La muestra con mayor diversidad en el estuario es la muestra 13 con un máximo de 17 especies diferentes. En la bahía, la muestra 14 presenta 22 especies y una asociación muerta abundante a lo largo de todo el año que incluye a la mayor parte de las especies encontradas en las muestras estuarinas.

En general, la cantidad de caparazones de foraminíferos y la diversidad específica mostraron una tendencia decreciente desde la zona inferior hasta la zona superior del estuario, con las asociaciones más abundantes y diversas situadas en los puntos menos protegidos de la mitad inferior del estuario (muestras 13 y 9). Además, como resultado de este efectivo transporte sedimentario por las corrientes mareales, el número de caparazones de foraminíferos varía enormemente a lo largo del año incluso en el mismo punto de muestreo. El caso más ilustrativo es el de la muestra 9 que presentó una asociación muerta con 21 individuos en octubre 1997, 53 individuos en enero 1998 y 222 individuos en abril 1998. Por el contrario, las asociaciones vivas en este mismo punto de muestreo mostraron uno, cero y dos individuos respectivamente (Fig. 2).

En total, 46 especies diferentes han sido encontradas como caparazones muertos. Esta cantidad incluye las 18

especies encontradas vivas en las muestras además de otras 28 especies que aparecen sólo en las asociaciones muertas. Las especies más comunes encontradas en las muestras estuarinas fueron *A. beccarii* y *H. germanica* que están presentes en todas las estaciones de muestreo a lo largo de todo el año con varios individuos (oscilando entre 1 y 65, con una media de 4 especímenes por muestra). El resto de las especies aparecen esporádicamente en algunas muestras y siempre con uno ó dos individuos solamente.

4.1.3. Interpretación del contenido microfaunístico

Como ya se ha mencionado anteriormente, la Ría de Bilbao ha sido utilizada tradicionalmente como zona de vertido de los efluentes domésticos e industriales producidos por una población de un millón de habitantes. La gran variedad de fuentes contaminantes y la mezcla compleja de las diferentes sustancias contaminantes en los sedimentos hace muy difícil la separación de sus efectos específicos sobre los foraminíferos bentónicos. La contaminación industrial, particularmente los metales pesados, tienen un efecto muy negativo sobre los foraminíferos. Diversos experimentos han mostrado que el efecto de un incremento en la contaminación por metales pesados es la reducción tanto de la abundancia como de la diversidad específica de las asociaciones (Yanko *et al.*, 1994) y, en algunos casos, la completa eliminación de los foraminíferos del estuario (Ellison *et al.*, 1986; Schafer *et al.*, 1991; Alve, 1991a). Por otro lado, se ha observado que el efecto de un incremento en la materia orgánica es inicialmente el de favorecer una o dos especies a expensas de las demás a una cierta distancia de la fuente de nutrientes, aunque un suministro excesivo de materia orgánica provoca el colapso de la comunidad bentónica debido probablemente a un bajo contenido en oxígeno y pH (Alve, 1995a).

En la Ría de Bilbao se han encontrado foraminíferos vivos únicamente en las zonas media e inferior del estuario, pero su número extraordinariamente bajo y la aparición sólo ocasional de las diferentes especies sugieren que éstas son transportadas dentro del estuario por las corrientes mareales, son capaces de sobrevivir durante un cierto período de tiempo, pero no son capaces de reproducirse dentro de este medio. El carácter anóxico de los sedimentos, probablemente combinado con el elevado contenido en contaminantes químicos, no permite a los foraminíferos recolonizar el estuario y desarrollar poblaciones estables.

Sen Gupta y Machain-Castillo (1993) concluyeron que las especies dominantes de foraminíferos bentónicos en hábitats bajo condiciones deficientes de oxígeno y duran-

te largos períodos de tiempo también están presentes (aunque no necesariamente como especies dominantes) en ambientes comparables bajo condiciones óxicas. Las especies tolerantes a bajos contenidos en oxígeno son únicamente oportunistas con éxito ya que son capaces de utilizar el recurso trófico del incremento en el contenido de materia orgánica que aparece generalmente asociado a una deficiencia en oxígeno. Una vez que las condiciones en la Ría de Bilbao sean menos dramáticas, estas mismas especies litorales típicas, que están continuamente entrando en el estuario como individuos vivos, serán entonces capaces de colonizar con éxito el estuario, ya que se encuentran particularmente adaptadas a desarrollarse en condiciones naturales de estrés ambiental.

4.2. Pequeños testigos

Debido a que los sedimentos superficiales de la Ría de Bilbao han mostrado unos niveles de contaminación muy elevados, se han seleccionado para su estudio tres testigos de sedimento (Fig. 1) con el fin de determinar el grado de cambio ambiental experimentado a lo largo del tiempo, tal y como aparece indicado por la evolución de las asociaciones fósiles de foraminíferos. Desgraciadamente, la escasa longitud de los testigos (50 cm) en comparación con la duración y la intensidad de los efluentes descargados en este estuario ha permitido obtener solamente un registro de los últimos años de impacto antrópico. Además, la continua alteración humana de los sedimentos en el canal mareal mediante el dragado y la navegación es la responsable de la naturaleza fragmentaria de este registro histórico.

4.2.1. Testigo Zorroza

El número de foraminíferos bentónicos que aparecen en este testigo es extremadamente pequeño. En total, sólo 103 caparazones de foraminíferos se encontraron en las 24 muestras analizadas. Los resultados del estudio micropaleontológico, que aparecen en la Fig. 3, se expresan como el número de caparazones de foraminíferos por 50 g de sedimento seco con el fin de permitir una comparación directa entre las diferentes muestras independientemente del peso original de las mismas. Siete muestras (3, 29, 33, 37, 45, 47 y 50) no contienen foraminíferos y el número máximo de individuos por muestra es 27 (muestra 25). A lo largo del sondeo, en aquellas muestras que contienen foraminíferos, el número de caparazones presente es generalmente igual o menor de cinco. Sólo cuatro muestras contienen un número mayor de individuos: muestra 1 con 14 caparazones, y el intervalo comprendido entre las muestras 25-27 con 27, 26 y 13 caparazones respectivamente.

En este testigo se han encontrado doce especies diferentes pero sólo *A. beccarii* y *H. germanica* aparecen comúnmente en todo el registro. La asociación característica del intervalo 25-27 está constituida por *A. beccarii* (máximo 19 especímenes en la muestra 25), *H. germanica* (máximo 7 especímenes en la muestra 26) y *Elphidium excavatum* (máximo 4 especímenes en la muestra 25). El resto de las especies aparece esporádicamente en las muestras y nunca lo hacen con más de dos individuos. Como hemos visto anteriormente, hoy en día no se encuentran especies vivas en la zona superior del estuario, y probablemente haya sido así durante la mayor parte del período industrial. En consecuencia, la presencia de caparazones de foraminíferos en este sondeo responde exclusivamente al transporte de partículas sedimentarias a esta zona desde la bahía mediante las corrientes mareales.

4.2.2. Testigo Erandio

El contenido en foraminíferos bentónicos de esta secuencia es muy diferente entre las mitades superior e inferior del testigo, a ambos lados de una superficie erosiva que se encuentra a 23 cm de profundidad (Fig. 3). Por encima de esta superficie erosiva el sedimento es básicamente fango con cantidades variables de arena. En esta zona superior el número de foraminíferos bentónicos es generalmente bajo aunque todas las muestras analizadas contienen caparazones de foraminíferos (oscilando entre 3 y 89 individuos por 50 g de sedimento seco). Las muestras que contienen una mayor abundancia de caparazones fueron la muestra 1 (41 individuos) y la muestra 10 (89 individuos). Las otras muestras contienen menos de 28 caparazones, con una media de 11 caparazones por 50 gr de sedimento seco. Por otra parte, debajo de la superficie erosiva el sedimento es básicamente arenoso y contiene abundantes foraminíferos bentónicos en todas las muestras, oscilando entre 77 y 338 caparazones, con una media de 202 individuos por 50 g de sedimento seco. En total, se encontraron 4.648 caparazones de foraminíferos en las 33 muestras analizadas de este testigo.

Se encontraron cincuenta y nueve especies diferentes pero las asociaciones están fuertemente dominadas por *A. beccarii* (media 42,4 %), *C. lobatula* (media 22,5 %) y *H. germanica* (media 18,5 %), que en conjunto constituyen aproximadamente el 85 % de la asociación característica. Otras especies comunes son *R. anomala* (media 2,8 %), *Elphidium williamsoni* (media 2,7 %), *E. excavatum* (media 2,4 %), *Rosalina irregularis* (media 1,9 %) y *Elphidium crispum* (media 0,8 %). Esta asociación de foraminíferos puede ser encontrada a lo largo de toda la secuencia sedimentaria, independiente-

mente de la gran variación en la abundancia de individuos entre las zonas superior e inferior del testigo. El índice de diversidad oscila entre 3 y 6 con un valor medio de 4. La composición química media de los caparazones en las asociaciones es 95,8 % hialinos, 2,8 % porcelanáceos, y 1,4 % aglutinantes.

4.2.3. Testigo Udondo

El número de foraminíferos bentónicos encontrados en este testigo es muy bajo y variable. En total, sólo 871 caparazones de foraminíferos fueron encontrados en las 26 muestras analizadas. Ocho muestras (7, 20, 30, 35, 37, 40, 43 y 47) no contienen foraminíferos y el máximo número de individuos por 50 g de sedimento seco es 349 (muestra 23). A lo largo del sondeo, en aquellas muestras que contienen foraminíferos, el número de caparazones oscila entre 1 y 40 individuos, con una abundancia media de 16 caparazones por 50 g de sedimento seco. Sólo tres muestras presentan un mayor número de individuos: las muestras 22 y 23 con 220 y 349 caparazones respectivamente, y la muestra 50 con 295 caparazones (Fig. 3).

Treinta y seis especies diferentes aparecieron en este testigo pero solamente *A. beccarii*, *H. germanica* y *C. lobatula* son especies comunes en toda la secuencia sedimentaria. La asociación característica del intervalo 22-23 está constituida por *A. beccarii* (media 37,9 %), *H. germanica* (media 25,6 %), *R. irregularis* (media 10,6 %), *R. anomala* (media 8,9 %), *E. excavatum* (media 7,2 %) y *C. lobatula* (media 2,5 %). En conjunto, estas especies representan el 93 % de la asociación característica. El valor medio del índice de diversidad es 3,5, y la composición química de los caparazones es 95,4 % hialinos y 4,6 % porcelanáceos. Por otra parte, la asociación de foraminíferos en la muestra 50 está constituida por *C. lobatula* (45,8 %), *H. germanica* (17,6 %), *A. beccarii* (15,4 %) y *Massilina secans* (5,3 %), representando en conjunto el 84 % de la asociación. El índice de diversidad es 4,5 y la composición química de los caparazones es 89,3 % hialinos, 9,9 % porcelanáceos y 0,8 % aglutinantes. El resto de las especies aparecen esporádicamente en las muestras y nunca presentan más de cinco individuos. Por lo tanto, este testigo presenta intervalos muy delgados con contenidos de foraminíferos abundantes y diversificados en las zonas media e inferior, junto con otros intervalos más amplios que presentan bajos contenidos o incluso ausencia de foraminíferos.

En general, la abundancia en foraminíferos de los tres testigos analizados refleja características similares a las encontradas en las asociaciones muertas obtenidas en los sedimentos superficiales: abundancias decrecientes hacia la parte superior del estuario y contenidos muy va-

riables en muestras próximas entre sí. (Fig. 3). La comparación de las características sedimentarias y los contenidos micropaleontológicos entre las muestras actuales y los testigos indican que las condiciones ambientales en este estuario han sido muy negativas durante las últimas décadas. Otra evidencia indirecta del impacto de esta contaminación persistente en el tiempo sobre este medio estuarino es la total ausencia de bioturbación a lo largo de las secuencias sedimentarias de los testigos.

4.3. Reconstrucción de la microfauna estuarina pre-industrial

Los efectos de la contaminación sobre la biota estuarina pueden ser evaluados comparando las comunidades biológicas naturales pre-industriales con aquellas que aparecen en las actuales condiciones degradadas. Este tipo de comparaciones no han sido generalmente utilizadas en programas de evaluación ambiental porque esta información sobre la biota pre-industrial no se encuentra siempre disponible. Además, la mayor parte de los organismos estuarinos no se preservan en los sedimentos tras su muerte. Sin embargo, la distribución vertical en testigos sedimentarios de aquellos organismos que sí se preservan, como los foraminíferos, constituye una herramienta muy adecuada para ilustrar los efectos históricos de la contaminación sobre el medio estudiado.

Los pequeños testigos descritos anteriormente no llegaron a alcanzar el período pre-industrial ya que todas las muestras analizadas contenían elevadas cantidades de metales pesados (Cearreta *et al.*, 2000). En consecuencia, el análisis de diferentes sondeos perforados en la Ría de Bilbao representa el único modo para conocer la paleomicrofauna que permita evaluar adecuadamente las consecuencias biológicas de la contaminación sobre este estuario.

Las asociaciones de foraminíferos bentónicos en las sucesiones holocenas pre-industriales de la Ría de Bilbao han sido descritas e interpretadas por Cearreta (1998). Cuatro sondeos fueron perforados en zonas estuarinas reclamadas a lo largo de la Ría y su contenido microfaunístico fue dividido en dos categorías por comparación con las asociaciones actuales de la misma zona costera cantábrica (Cearreta, 1988b): por una parte, especies indígenas (que viven y se reproducen dentro del estuario) y, por otra, especies exóticas (transportadas desde la plataforma dentro del área estuarina deposicional). La abundancia de foraminíferos es muy alta en todos los sondeos y la diversidad de especies se incrementa hacia la desembocadura como consecuencia de la entrada de especies exóticas desde el mar abierto. La principal asociación indígena encontrada en estas se-

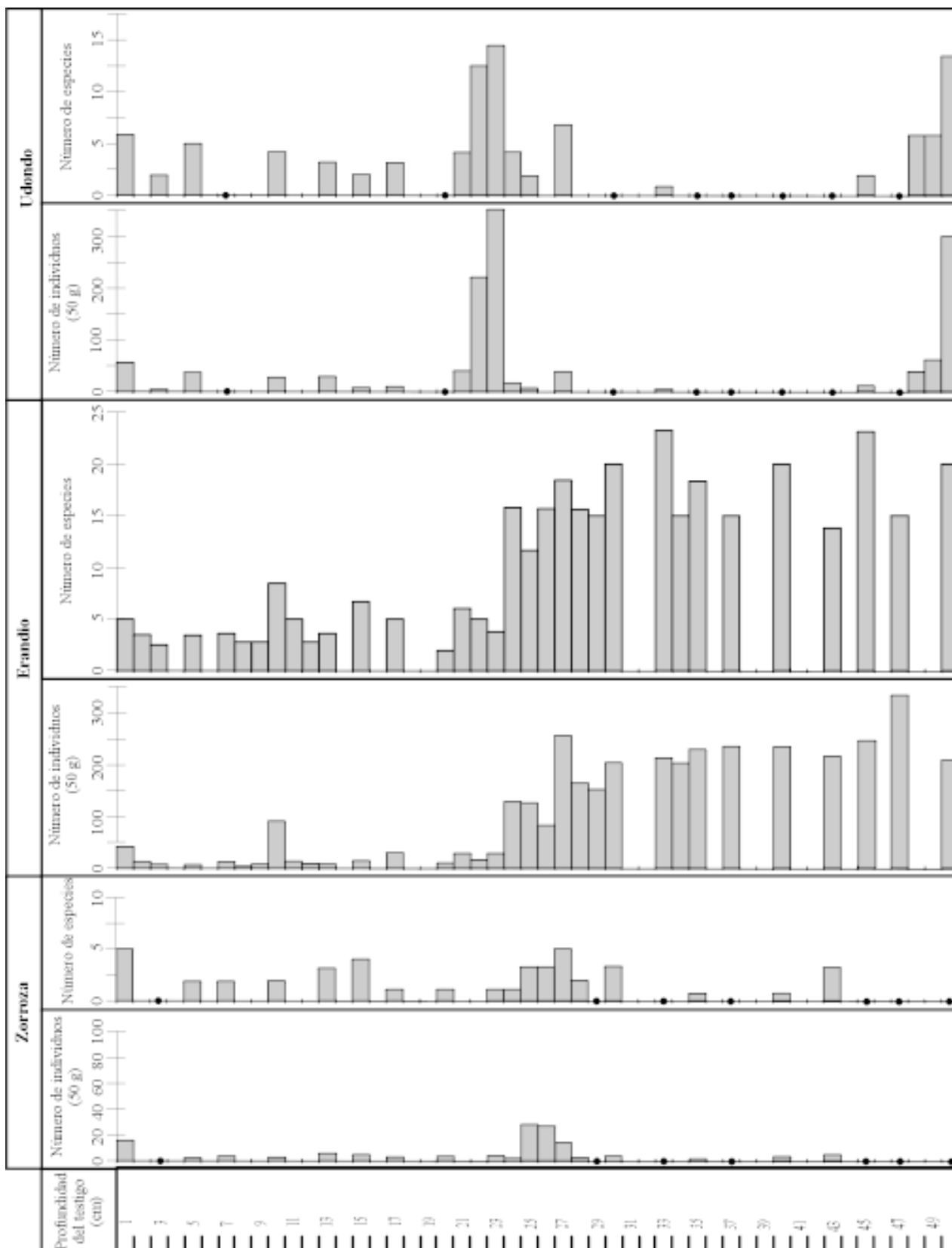


Fig. 3. Abundancia absoluta de caparazones y especies de foraminíferos en los pequeños testigos de Zorroza, Erandio y Udondo (Ría de Bilbao). Los puntos negros representan las muestras estudiadas que no contienen foraminíferos.

Fig. 3. Absolute abundance of foraminiferal tests and species in the Zorroza, Erandio and Udondo short cores (Bilbao Estuary). Black dots represent samples barren of foraminifera.

cuencias sedimentarias está constituida por *A. beccarii*/*H. germanica* que sugiere diferentes medios intermareales, tanto salobres (en asociación con *Elphidium oceanensis* en sedimentos fangosos o con *E. williamsoni* en sedimentos arenosos), como de salinidad marino-normal (junto con *B. britannica*/*Bolivina pseudoplicata*), o de marisma baja (en asociación con *Jadammina macrescens*/*Trochammina inflata*/*Arenoparrella mexicana*). Por otro lado, la asociación exótica más importante está dominada por *C. lobatula*, en asociación con taxones epifaunales fijos (*Rosalina* spp.) o con formas de vida libre (*M. secans*), todas ellas indicando áreas fuente de mar abierto.

Algunas de las características sedimentarias encontradas en estos sondeos fueron interpretadas en el contexto de los registros históricos de la Villa y Puerto de Bilbao como, por ejemplo, las gravas de origen fluvial que aparecieron en los sondeos del estuario superior y que habían sido eliminadas del canal navegable mediante dragado en 1885 (Junta de Obras del Puerto, 1910), o los depósitos de playa y dunas arenosas que originalmente caracterizaban la zona de la desembocadura y que aparecieron en los sondeos del estuario inferior, y que fueron destruidos por el desarrollo urbano en esta zona desde 1857 (García-Merino, 1987).

Dataciones radiométricas efectuadas en diferentes secuencias holocenas a lo largo de este estuario (datos inéditos) han aportado una edad máxima de 8420±90 BP (a -27 m de profundidad en la base de la secuencia holocena en el estuario inferior) lo que sugiere que, al menos durante los últimos 8000 años, la Ría de Bilbao se ha caracterizado por unas asociaciones de foraminíferos que se asemejan a aquellas microfaunas que se encuentran actualmente en los estuarios no contaminados de la costa Cantábrica. Sin embargo, el aporte continuo de materia orgánica y otros contaminantes durante los últimos 150 años ha eliminado la microfauna del estuario y ha restringido la distribución actual de las poblaciones vivas de foraminíferos a la zona de la bahía.

5. Conclusiones

Este trabajo apoya la utilización del análisis micropaleontológico como una técnica muy útil en el seguimiento de la transformación ambiental estuarina. Por otra parte, la calidad de preservación de los caparzones de foraminíferos en los sedimentos de la Ría de Bilbao, que no presentan señales de disolución ni signos de piritización, garantiza el mejor registro posible de la respuesta biológica a la transformación ambiental extrema sufrida por este estuario.

Como aparece ilustrado mediante la comparación

entre las condiciones originales y las características recientes, al menos durante los últimos 8000 años la Ría de Bilbao ha estado caracterizada por el desarrollo de una gran variedad de medios mareales que contenían abundantes asociaciones de foraminíferos bentónicos. Sin embargo, desde mediados del siglo XIX la ocupación completa de los dominios estuarinos que redujo el estuario original a un simple canal mareal, y el incremento de los vertidos industriales y domésticos sin tratamiento previo directamente al estuario han provocado un cambio dramático en las características químicas de los sedimentos y la total eliminación de la microfauna característica.

Un posible estudio de las asociaciones de foraminíferos contenidas en un registro sedimentario más largo y completo que incluya la transformación ambiental iniciada a finales del siglo pasado en este estuario (desde un medio natural hasta otro dominado antrópicamente) podría ilustrar el proceso de reemplazamiento químico y biológico, y además podría contener los pasos intermedios entre las condiciones originales y las que presenta en la actualidad.

Hoy en día, la presencia en las muestras superficiales de la Ría de Bilbao de algunos foraminíferos vivos transportados cuyas especies han sido identificadas como dominantes en otros medios estuarinos de la misma costa Cantábrica y en el propio estuario original de Bilbao, sugieren la posibilidad de una recolonización satisfactoria de las zonas defaunadas una vez que las condiciones ambientales mejoren suficientemente. En consecuencia, la microfauna puede ser utilizada como una herramienta para determinar la efectividad del programa de regeneración ambiental impulsado por las instituciones locales.

Agradecimientos: Este trabajo es una contribución al Proyecto de Investigación AMB96-0464 (CICYT, I+D Medio Ambiente) y ha sido apoyado por el Consorcio de Aguas Bilbao Bizkaia y el Departamento de Medio Ambiente del Gobierno Vasco.

Referencias bibliográficas

- Alve, E., 1991a. Benthic foraminifera in sediment cores reflecting heavy metal pollution in Sørkjord, western Norway. *J. Foramin. Res.* 21: 1-19.
- Alve, E., 1991b. Foraminifera, climatic change, and pollution: a study of late Holocene sediments in Drammensfjord, southeast Norway. *The Holocene* 1: 243-261.
- Alve, E., 1995. Benthic foraminiferal responses to estuarine pollution: a review. *J. Foramin. Res.* 25: 190-203.
- Bilbao Metrópoli-30, 1998. *Memoria Informe de Progreso 1997*. Bilbao: 343 pp.
- Cearreta, A., 1988. Distribution and ecology of benthic foraminifera in the Santoña estuary, Spain. *Rev. Española Paleont.* 3: 23-38.

- Cearreta, A., 1992. Cambios medioambientales en la Ría de Bilbao durante el Holoceno. *Cuadernos de la Sección de Historia de Eusko Ikaskuntza* 20: 435-454.
- Cearreta, A., 1998. Holocene sea-level change in the Bilbao estuary (North Spain): foraminiferal evidence. *Micropaleontology* 44: 265-276.
- Cearreta, A., M.J. Irabien, E. Leorri, I. Yusta, I.W. Croudace y A.B. Cundy, 2000. Recent Anthropogenic impacts on the Bilbao Estuary, Northern Spain: Geochemical and Microfaunal evidence. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*: 50.
- Consorcio de Aguas del Gran Bilbao, 1989. Chequeo y afino del modelo matemático del estuario del Nervión y para el seguimiento del estudio oceanográfico de El Abra y su entorno (1988). *Memoria Volumen I: tributarios y estuario*. Informe inédito. Bilbao: 236 pp.
- Ellison, R.L., R. Broome y R. Ogilvie, 1986. Foraminiferal response to trace metal contamination in the Patapsco River and Baltimore Harbour, Maryland. *Marine Poll. Bull.* 17: 419-423.
- García-Merino, L.V., 1987. *La formación de una ciudad industrial. El despegue urbano de Bilbao*. Instituto Vasco de la Administración Pública, Bilbao: 844 pp.
- Hazera, J., 1968. La región de Bilbao et son arrière-pays: Etude géomorphologique. *Munibe* 20: 1-358.
- Junta de Obras del Puerto de Bilbao, 1910. *Churruca y el Puerto de Bilbao (Apuntes biográficos, Antecedentes históricos y Resumen descriptivo de las obras de mejora de la Ría y Puerto de Bilbao)*. Imprenta Emeterio Verdes. Bilbao: 165 pp.
- Murray, J.W., 1979. British Nearshore Foraminiferids. *Synopsis of the British Fauna (New Series)* 16: 1-68. London.
- Murray, J.W., 1991. *Ecology and Palaeoecology of Benthic Foraminifera*. Longman, Harlow: 397 pp.
- Rivas, V., 1991. *Evolución reciente y estado actual del litoral cantábrico oriental*. Tesis Doctoral, Universidad de Murcia. Inédita: 537 pp.
- Sáiz-Salinas, J.I., G. Francés-Zubillaga y X. Imaz-Eizaguirre, 1996. *Uso de bioindicadores en la evaluación de la contaminación de la Ría de Bilbao*. Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco/E.H.U., Bilbao: 537 pp.
- Schafer, C.T., E.S. Collins y J.N. Smith, 1991. Relationship of foraminifera and thecamoebian distributions to sediments contaminated by pulp mill effluent: Saguenay Fiord, Quebec, Canada. *Marine Micropal.* 17: 255-283.
- Sen Gupta, B.K. y M.L. Machain-Castillo, 1993. Benthic foraminifera in oxygen-poor habitats. *Marine Micropal.* 20: 183-201.
- Urrutia, J., 1986. *Estudio de la estructura y funcionamiento del estuario del Nervión en relación a la dinámica del fitoplancton*. Tesis Doctoral, Universidad del País Vasco/E.H.U.: 241 pp.
- Walton, W.R., 1952. Techniques for recognition of living foraminifera. *Contributions from the Cushman Foundation for Foraminiferal Research* 3: 56-60.
- Yanko, V., J. Kronfeld y A. Flexer, 1994. Response of benthic foraminifera to various pollution sources: implications for pollution monitoring. *J. Foramin. Res.* 24: 1-17.