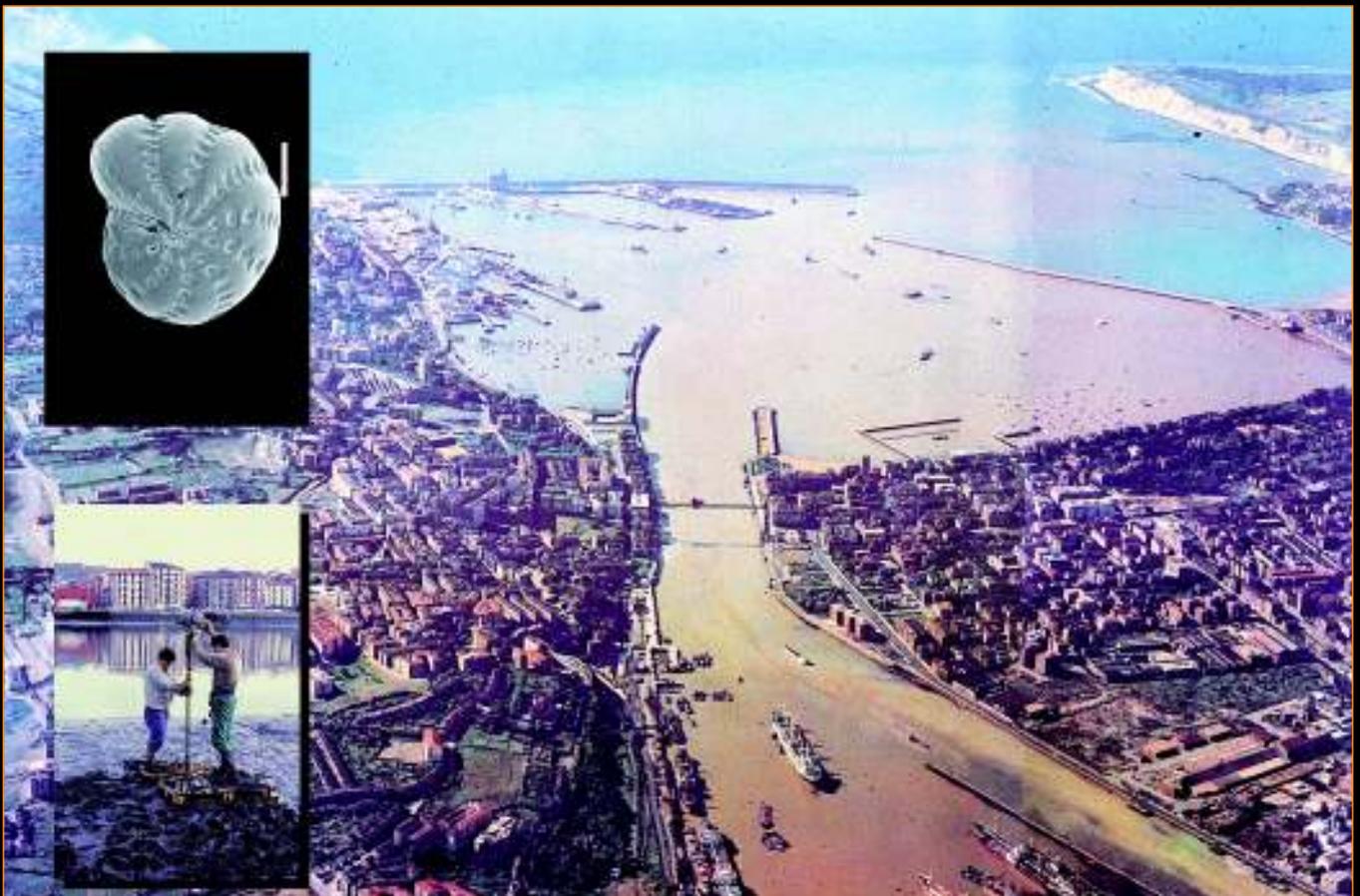


El registro geológico de la transformación ambiental de la ría de Bilbao durante el Holoceno y el Antropoceno



EDUARDO LEORRI
ALEJANDRO CEARRETA



ARANZADI

zientzia elkartea . sociedad de ciencias
society of sciences . société de sciences



Eduardo Leorri Aranzadi Zientzi Elkarteko kidea da. Geologian lizentziaduna Euskal Herriko Unibertsitatean (UPV/EHU), unibertsitate horretan bertan egin zuen doktore tesia. Unibertsitate hauetan jardun du ikertzen: Delawere (AEB), Angergs (Frantzia) eta Lisboa (Portugal). Azken urteotan Europako kostalde kontinental atlantikoan itsasoaren mailan izandako aldaketei buruzko bereizmen handiko lehen geologia-ikerlanen egilea da.

Eduardo Leorri es miembro activo de la Sociedad de Ciencias Aranzadi. Licenciado en Ciencias Geológicas por la Universidad del País Vasco (UPV/EHU), se doctoró posteriormente en esa misma universidad. Ha desarrollado su actividad investigadora en las universidades de Delaware (EEUU), Angers (Francia) y Lisboa (Portugal). Es autor de los primeros trabajos geológicos de cambios en el nivel del mar reciente de alta resolución de la costa continental atlántica europea.

munibe

SUPLEMENTO - GEHIGARRIA 26

El registro geológico de la transformación
ambiental de la ría de Bilbao durante
el Holoceno y el Antropoceno

EDUARDO LEORRI
ALEJANDRO CEARRETA

Ficha catalográfica recomendada / Gomendatutako katalogo fitxa

LEORRI SORIANO, Eduardo

El registro geológico de la transformación ambiental de la ría de Bilbao durante el Holoceno y el Antropoceno / Eduardo Leorri, Alejandro Cearreta. – Donostia : Sociedad de Ciencias Aranzadi, 2009-02-27

188 p. : il. en col. y n. – (Munibe. Suplemento, ISSN 1698-3807 ; 26)
Basado en parte en la tesis doctoral de Eduardo Leorri (Univ. País Vasco, 2003)
D.L. SS-290/09. ISBN 978-84-93586-2-4

I. Cearreta, Alejandro 1. Geología ambiental – Ría de Bilbao (Bizkaia, País Vasco) 2. Geología estratigráfica – Holoceno 3. Geomorfología 4. Reconstrucción ambiental 5. Geología costera 6. Estuarios

C.D.U. 55:504(460.152 Ría de Bilbao)
551.4(460.152)

O

Munibe es una revista científica que comienza a publicarse en 1949. A partir de 1984 se divide en dos series. Una, Munibe Antropología-Arkeologia con ISSN 1132-2217 y la otra, Munibe Natur Zientziak con ISSN 0214-7688. Ambas se completan con diversos Suplementos.

Munibe zientzia aldizkaria 1949 urtean hasi zen argitaratzen. 1984. urteaz geroztik, bi sailetan banatuta dago. Bata, Munibe Antropologia-Arkeologia, 1132-2217 ISSN-duna; eta bestea, Munibe Natur Zientziak, 0214-7688 ISSN-duna. Biek hainbat Eranskin dituzte osagarri modura.

Dirijase toda la correspondencia a /
Zuzendu gutunak helbide honetara:

SOCIEDAD DE CIENCIAS ARANZADI ZIENTZI ELKARTEA

Zorroagagaina 11

20014 Donostia

Tel. 943 466142 • Fax 943 455811

e-mail: idazkaritza@aranzadi-zientziak.org • www.aranzadi-zientziak.org

Maquetación / Maketazioa: TamTam diseño, eventos & multimedia S.L.
Imprime / Inprimatzen du: Gráficas Lizarra, S.L.

ISBN 978-84-93586-2-4. D.L. SS-290/09
Munibe. Suplemento ISSN 1698-3807

Entidades colaboradoras / Elkarte laguntzaileak:

Patrocinador / Babeslea:



AGRADECIMIENTOS

Este volumen es el resultado de 10 años de trabajo de un colectivo de investigadores que se integran dentro del grupo HAREA-Geología Litoral de la Facultad de Ciencia y Tecnología de la Universidad del País Vasco/EHU. Ha sido especialmente significativa la aportación de María Jesús Irabien Gulias (Departamento de Mineralogía y Petrología, UPV/EHU) que ha participado en todas las actividades desarrolladas desde su inicio, colaborando en los diversos proyectos que han financiado la investigación que aquí se presenta y apoyando la solicitud económica que financia esta publicación.

También es destacable la aportación del Departamento de Estratigrafía y Paleontología (UPV/EHU) y de la Sociedad de Ciencias Aranzadi, especialmente la ayuda ofrecida por Juan Martín Gardoki, Juanxo Agirre y Mertxe Labara.

Jean-Pierre Debenay (Departamento de Geología, Universidad de Angers, F) y Juan Usera (Departamento de Biología, Universidad de Valencia) acogieron temporalmente a Eduardo Leorri en sus respectivos laboratorios. Iñaki Yusta (Departamento de Mineralogía y Petrología, UPV/EHU) ha aportado los análisis geoquímicos. Mikel Alvarez y Txomin Grande (Hospital de Basurto, Bilbao) facilitaron el acceso a su equipo de rayos-X. José Ramón Marinabeitia (Metro Bilbao) y Juan Pamo (TerraNova s.l.) cedieron los sondeos holocenos de la Ría de Bilbao. Txema Esparza (Geyser HPC) fue responsable de la realización de los sondeos de percusión. Borja González (Laukiz S.L.) determinó la localización topográfica de los puntos de muestreo. Javier Corral (Dow Chemical) aportó información histórica sobre la actividad industrial en el entorno de la Ría de Bilbao. Juan Ignacio Baceta (Universidad del País Vasco/EHU), Karen L. Knudsen (Universidad de Aarhus, DK), John W. Murray (Centro Oceanográfico de Southampton, UK) y José Ignacio Sáiz Salinas (Universidad del País Vasco/EHU) llevaron a cabo revisiones críticas de algunas partes del trabajo que han servido para mejorar este volumen monográfico. Ian W. Croudace (Centro Oceanográfico de Southampton, UK) y Andrew B. Cundy (Universidad de Sussex, UK) fueron los responsables de los análisis de radionucleidos Cs-137 y Pb-210. Luisa Santos (Universidad de A Coruña) realizó el análisis polínico de los sondeos holocenos del meandro abandonado de Barakaldo. Almudena Quintanilla estudió algunas muestras superficiales y las muestras del sondeo de percusión de Galindo como parte de sus prácticas de Micropaleontología (5º curso de C. Geológicas) durante el año académico 1999-2000.

Durante la realización de este trabajo, Eduardo Leorri obtuvo una beca predoctoral del Ministerio de Educación y Cultura (MEC AP96 20184809) y financiación postdoctoral del Departamento de Educación del Gobierno Vasco, El Conseil Général de la Vendée, Francia y el Departamento de Formação de Recursos Humanos, Portugal (contrato SFRH/BPD/44750/2008).

La investigación desarrollada ha sido financiada a través de los siguientes proyectos: MEC 121.310-0464/96 y AMB96-0464 (Ministerio de Educación y Ciencia), 121.310-EA041/92, 121.310-EC221/97, 076.310-EB046/99 y GIU 06/10 (Universidad del País Vasco/EHU), UNESCO06/08 y GIC07/32-IT-332-07 (Gobierno Vasco).

Este volumen es una contribución a los proyectos IGCP #437 y #495.

La publicación de este volumen ha sido posible gracias a la financiación aportada por el Departamento de Educación, Universidades e Investigación del Gobierno Vasco (AE-2008-1-24).

EDUARDO LEORRI y ALEJANDRO CEARRETA

Autores

Este volumen esta dedicado a nuestras familias y especialmente a Nieves González y Marthe Innocenti.

A U R K I B I D E A / I N D I C E

AGRADEMIENTOS	5
RESUMEN	13
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	17
1.1. APLICACIÓN DE LOS FORAMINÍFEROS COMO INDICADORES (PALEO)AMBIENTALES.....	19
1.1.A) <i>FORAMINÍFEROS ESTUARINOS COMO INDICADORES</i>	19
1.1.B) <i>PARÁMETROS DE INTERÉS (PALEO)AMBIENTAL EN LAS ASOCIACIONES VIVAS, MUERTAS Y ENTERRADAS</i>	20
1.1.C) <i>TÉCNICAS DE LABORATORIO</i>	24
1.2. TRABAJOS PREVIOS SOBRE FORAMINÍFEROS EN LA ZONA GEOGRÁFICA DE ESTUDIO	25
1.3. CARACTERÍSTICAS AMBIENTALES DE LA RÍA DE BILBAO.....	28
1.3.A) <i>CONTEXTO GEOLÓGICO Y GEOGRÁFICO</i>	28
1.3.B) <i>TRANSFORMACIÓN HISTÓRICA DE LA RÍA DE BILBAO</i>	33
1.4. OBJETIVOS DE ESTA INVESTIGACIÓN.....	50
2. PROCESOS NATURALES (8500 BP-SIGLO XIX)	51
2.1. INTRODUCCIÓN	53
2.2. EJE PRINCIPAL DEL ESTUARIO	55
2.2.A) <i>MATERIALES Y MÉTODOS</i>	55
2.2.B) <i>RESULTADOS</i>	57
2.2.C) <i>DISCUSIÓN</i>	68
2.3. MEANDRO ABANDONADO DE BARAKALDO	75
2.3.A) <i>MATERIALES Y MÉTODOS</i>	76
2.3.B) <i>RESULTADOS</i>	76
2.3.C) <i>DISCUSIÓN</i>	80
2.4. CONCLUSIONES	82
3. ETAPA INDUSTRIAL (SIGLOS XIX-XX)	93
3.1. INTRODUCCIÓN	95
3.1.A) <i>EL ÁREA DE ESTUDIO</i>	95
3.2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	95

3.3. RESULTADOS	99
3.3.A) SONDEO DE PERCUSIÓN ZORROZA (PCZ)	99
3.3.B) SONDEO DE PERCUSIÓN ASUA (PCA)	99
3.3.C) SONDEO DE PERCUSIÓN ERANDIO (PCE).....	103
3.3.D) SONDEO DE PERCUSIÓN GALINDO (PCGa)	103
3.3.E) SONDEO DE PERCUSIÓN SIMONDROGAS (PCS).....	105
3.3.F) SONDEO DE PERCUSIÓN GOBELAS (PCGb).....	107
3.4. DISCUSIÓN.....	111
3.4.A) EL REGISTRO SEDIMENTARIO EN LA RÍA DE BILBAO: ÉPOCA PRE-INDUSTRIAL.....	111
3.4.B) EL REGISTRO SEDIMENTARIO EN LA RÍA DE BILBAO: PERIODO INDUSTRIAL	111
3.5. CONCLUSIONES.....	113
4. SITUACIÓN RECIENTE (ÚLTIMOS 50 AÑOS)	119
4.1. INTRODUCCIÓN	121
4.2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	121
4.2.A) MUESTRAS SUPERFICIALES.....	121
4.2.B) PEQUEÑOS TESTIGOS	121
4.3. RESULTADOS	123
4.3.A) MUESTRAS SUPERFICIALES.....	123
4.3.B) PEQUEÑOS TESTIGOS	128
4.4. DISCUSIÓN	140
4.4.A) VARIACIONES AMBIENTALES RECIENTES EN LA RÍA DE BILBAO.....	140
4.4.B) IMPLICACIONES PARA LAS MEDIDAS DE RECUPERACIÓN AMBIENTAL EN LA RÍA DE BILBAO	142
4.5. CONCLUSIONES	142
5. REGENERACIÓN AMBIENTAL	147
5.1. INTRODUCCIÓN	149
5.2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	149
5.3. RESULTADOS	152
5.3.A) ASOCIACIONES VIVAS.....	152
5.3.B) ASOCIACIONES MUERTAS.....	155
5.3.C) ESTUDIO GEOQUÍMICO	158
5.4. DISCUSIÓN.....	158
5.4.A) INTERPRETACIÓN DEL CONTENIDO MICROFAUNÍSTICO Y EVALUACIÓN DEL DESARROLLO TEMPORAL DE LAS ASOCIACIONES DE FORAMINÍFEROS BENTÓNICOS EN LAS MUESTRAS SUPERFICIALES.....	158
5.5. CONCLUSIONES	162
6. CONCLUSIONES	167
7. BIBLIOGRAFÍA.....	173
8. ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS	183



**El registro geológico de la transformación ambiental
de la ría de Bilbao durante el Holoceno y el Antropoceno**

Leorri & Cearreta

El registro geológico de la transformación ambiental de la ría de Bilbao durante el Holoceno y el Antropoceno

RESUMEN

La zona oriental de la costa cantábrica está caracterizada por rocas sedimentarias Mesozoicas-Cenozoicas, que forman un perfil costero de altos acantilados interrumpido por pequeños y estrechos estuarios separados del mar abierto por barras de arena, playas y depósitos dunares. La morfología y extensión de los diferentes medios sedimentarios estuarinos es constantemente alterada por la erosión y el depósito de sedimentos, siendo éstos muy sensibles a los pequeños cambios del nivel del mar. El episodio transgresivo holoceno provocó el depósito de grandes volúmenes de sedimentos estuarinos bien preservados, que pueden ser estudiados para entender las variaciones ambientales y los cambios del nivel del mar que se han producido durante esta última fase interglaciar.

La Ría de Bilbao fue originalmente la zona estuarina más extensa de la costa Cantábrica. El estuario moderno tiene 15 km de longitud, una anchura media de 100 m y un canal con una profundidad media de 2 m en la cabecera y de 9 m en la desembocadura del estuario. Está formado por el tramo mareal del río Nervión, aunque cuatro afluentes (Kadagua, Asua, Galindo y Gobelás) descargan dentro de la propia ría. El canal mareal desemboca en una amplia bahía denominada El Abra (anchura media 3,5 km; hasta 30 m de profundidad). Las mareas son semidiurnas, con rangos que van desde 4,6 m (mareas vivas) a 1,2 m (mareas muertas).

Desde el asentamiento de la primera industria del hierro y el acero que se instaló sobre las marismas de la zona media del estuario en 1854, las características naturales de la Ría de Bilbao han sido dramáticamente modificadas por el desarrollo urbano, industrial y portuario de esta zona. La explotación de las abundantes menas de hierro locales condujo a su temprano desarrollo industrial a mediados del siglo XIX. El estuario original fue rápidamente reducido por la ocupación de terrenos, dejando únicamente un canal mareal. Este canal fue aislado de las áreas intermareales originales mediante la construcción de diques, con el fin de conseguir un curso navegable desde la ciudad hasta el mar abierto. Hoy en día la Ría de Bilbao es un sistema totalmente artificial, que presenta un mínimo parecido a lo que fuera originalmente. La superficie estuarina total ocupada por la actividad humana alcanza aproximadamente las 1000 ha.

Durante los últimos 150 años el estuario actual ha recibido vertidos de muy diversas fuentes (lavado mineral, vertidos industriales y efluentes urbanos) que han degradado significativamente la calidad ambiental de la ría, convirtiéndola en el estuario más contaminado del litoral cantábrico. Sin embargo, a lo largo de las últimas décadas se ha producido un descenso significativo en los vertidos de contaminantes debido a la implementación de políticas de protección medioambiental, al desarrollo de sistemas de tratamiento de los vertidos y al cierre de las fábricas más importantes durante los últimos años de recesión económica.

Además, actualmente la regeneración ambiental de este estuario se está acometiendo como parte del denominado Plan Estratégico para la Revitalización del Bilbao Metropolitano. Los metales pesados y los contaminantes orgánicos que se han vertido a la ría sin ningún tipo de control han sido captados por los sedimentos, especialmente por los materiales más finos. La acumulación de sedimentos contaminados puede provocar que estos contaminantes queden atrapados durante largos periodos de tiempo en los estuarios o en las bahías. Sin embargo, un cambio en las condiciones del medio puede provocar su liberación al medio, incluso después de haber implementado procedimientos de limpieza y de haber limitado los vertidos, provocando un impacto ambiental significativo.

Con el fin de generar una reconstrucción paleoambiental de la Ría de Bilbao desde su formación tras el último cambio climático y durante el consiguiente ascenso del nivel del mar postglaciar, se ha analizado el contenido micropaleontológico (foraminíferos bentónicos) de nueve sondeos de rotación, obtenidos en las áreas ocupadas del canal principal del estuario en sus zonas media e inferior y de dos sondeos situados en un antiguo meandro abandonado que el río Nervión formó originalmente alrededor de Barakaldo. La integración de estos resultados con los obtenidos en sondeos previamente estudiados, ha permitido reconstruir la evolución ambiental de este estuario durante el Holoceno. Este desarrollo ambiental se ha organizado en diferentes cortejos sedimentarios siguiendo una interpretación de secuencias estratigráficas. Las dataciones de radiocarbono y análisis polínicos preliminares, han permitido localizar en el tiempo los diferentes paleoambientes y episodios identificados en los sondeos. Así, la estructura del relleno sedimentario de la Ría de Bilbao estaría formada en primer lugar por gravas y arenas de grano grueso de origen fluvial con ausencia casi total de foraminíferos que representan unas condiciones de nivel de mar bajo durante la época Tardiglaciar (cortejo de nivel del mar bajo-LST). Posteriormente, durante la transgresión marina (8500-3000 años cal BP), se depositan los materiales que componen el cortejo transgresivo (TST). En el estuario inferior estos materiales muestran principalmente un carácter marino-proximal, mientras que en la zona media los sedimentos presentan intercalaciones entre materiales salobres y marino-proximales, y en la zona superior del estuario y en el meandro de Barakaldo sólo se depositaron materiales salobres. La parte final del TST está representada por sedimentos marinos (con predominio de foraminíferos exóticos). En último lugar se deposita el cortejo sedimentario de nivel de mar alto (HST) depositado durante el Holoceno superior (desde 3000 años cal BP hasta la ocupación humana del siglo XIX), que se caracteriza por unas condiciones intermareales y supramareales salobres correspondientes a un relleno posterior a la estabilización del nivel marino. La comparación de estos datos con otros procedentes de diferentes áreas del Golfo de Bizkaia permite reconstruir un esquema general de los cambios del nivel marino y de la consecuente evolución costera de esta zona durante, al menos, los últimos 8500 años.

Por otra parte, y con la idea de llevar a cabo una evaluación del impacto histórico de los contaminantes en el ecosistema estuarino, se han perforado seis sondeos en las llanuras mareales de la Ría de Bilbao que han reflejado el extenso registro de los aportes antropogénicos en este medio. A través del estudio micropaleontológico y geoquímico de estos sondeos es posible diferenciar tres zonas en el registro sedimentario reciente. La zona inferior, en la que se reflejan las condiciones estuarinas pre-industriales, está caracterizada por asociaciones de foraminíferos biodiversas y abundantes con un nivel de metales pesados similar o inferior al nivel geoquímico de fondo local. La segunda zona, la zona industrial antigua (periodo 1850-1950), está caracterizada por elevadas concentraciones de metales en el estuario que permitieron la existencia de asociaciones de foraminíferos relativamente abundantes. La tercera zona, la zona industrial reciente (periodo 1950-2000), está caracterizada por la desaparición de las asociaciones de foraminíferos, probablemente causada por niveles de oxígeno mínimos durante este periodo. Estas dos últimas zonas forman el registro sedimentario del periodo industrial.

Por último, mediante el estudio de la distribución y abundancia de los foraminíferos bentónicos (además del análisis geoquímico de metales pesados) presentes en muestras superficiales (1997-2003) y pequeños testigos recogidos en las llanuras intermareales de este estuario, se ha podido conocer la situación actual de la Ría de Bilbao en términos ambientales. Además, estos resultados permiten reconstruir la historia más reciente del impacto antrópico sobre la Ría de Bilbao, tal y como aparece registrado en sus sedimentos, y también contribuyen a crear una red de muestreo que ayude a evaluar en un futuro el progreso de su regeneración ambiental. Por otra parte, se han realizado análisis de Pb-210 y Cs-137 con la intención de asignar una cronología a los aportes contaminantes y a los cambios ambientales detectados. Además se ha procedido a evaluar la posible mejora ambiental producida durante los últimos años y la recuperación ecológica derivada de la implementación de las medidas correctoras anteriormente citadas, mediante el estudio del seguimiento estacional y anual de la distribución de foraminíferos bentónicos y elementos químicos presentes en las muestras superficiales de las llanuras intermareales de la Ría de Bilbao.

LABURPENA

Kantauriko kostaldeko ekialdea Mesozoiko-Zenozoikoko arroka sedimentarioek osatzen dute, labar garaidun kostaldea eratuz. Estuarioak meheak eta txikiak dira eta itsas zabaletik areazko barren, hondartzen eta duna itxurako metakinen bidez bereizirik dauden. Estuarioen sedimentu-guneen morfologia eta hedapena etengabe eraldatzen dute higadurak eta sedimentuen metaketak, zeinek nabarmen islatzen dituzten itsas-mailaren aldaketak. Holozenoko transgresio gertakariak ondo kontserbatutako estuario-sedimentu askoren pilaketa ekarri zuen. Sedimentu hauen ikerketa erabilgarria da ingurunearen aldaketak interglaziar honetan jazotako itsas-mailaren aldaketak ulertzearen.

Bilboko Itsasadarra, jatorriz, Kantauriko Kostaldeko estuario zabalena izan zen. Egungo estuarioa 15 Km luze eta 100 m zabal da batz bestea. Ubideak 2 metroko sakonera dauka burualdean eta 9 m inguru bokalean. Estuarioa Nerbioi ibaiaren itsasaldien menpeko tartek osatzen du, lau ibaiadarrek (Kadagua, Asua, Galindo eta Gobelak) itsasadarrera bertan urak isurtzen badituzte ere. Marea-ubidea Abra izeneko itsasadar handian itsasoratzen da (batz bestea 3,5 km zabal, eta sakonera handiena 30 metrokoa). Itsasaldiak egun erdikoak dira, eta mailak 4,6 metro (marea biziak) eta 1,2 metro (marea hilak) bitartean izan ohi dira.

1854 aldera estuarioaren erdiko guneko paduretan ezarri zen burdinaren eta altzairuaren industriaren finkapenez geroztik, industriaren, portuaren eta hiriaren garapenak Bilboko Itsasadarraren berezko ezaugarriak bortizki eraldatu ditu. Bertoko burdina ugariaren ustiapenak industriaren garapen goiztiarra bultzatu zuen XIX. mendeko erdialdean. Jatorrizko estuarioa azkar murriztu zuten lurren okupazioaren bitartez eta marea-ubidea baino ez zuten utzi. Kai-muturren bidez jatorrizko marea-guneetatik isolatu zuten ubide hau, hirietatik itsas-zabalerako bide nabigagarria lortzekotan. Gaur egun, Bilboko Itsasadarra sistema artifiziala dugu erabat, bere jatorrian zenaren inolako antzarik ez duena. Gizakiaren ekintzez galdutako estuario-azalera, orotara, 1000 ha ingurukoa dugu.

Azken 150 urteotan zehar egungo estuarioak oso jatorri ezberdineko isuriak jaso ditu (meatz ikazketa, industriaren eta hiriaren isuriak). Berauek oso nabarmen andeatu dute itsasadarraren ingurune-kalitatea, Nerbioia Kantauriko kostaldeko estuario kutsatuena bihurtuz. Dena dela, azken hamarkada hauetan, isuri kutsakorren kopuruak behera egin du ingurunearen babesari begirako politika zenbaiten txertatzea, isurien tratamenduaren sistemen garapena, eta azken urteotako ekonomia-ateraldiaren erruz zenbait lantegien itxia direla bide. Honez gain, gaur egun estuario honen ingurugiro-ondideratzea "Plan Estratégico para la Revitalización del Bilbao Metropolitano" delakoaren parte garrantzitsua da. Sedimentuek, bere ziki gai finenek, inolako kontrolik gabe isuri diren metal astunak eta kutsatzaile organikoak bildu dituzte. Sedimentu kutsatuen pilaketaren ondorioz, kutsatzaile hauek denbora luzerako gera litezke harripaturik estuario eta badietan. Hala ere, ingurunearen aldaketaren batek berauen askapena eragin lezake, ikazketa lanak abian jarrita eta isuriak murriztuta ere, ingurugiroan eragin latza sorraraziz.

Bilboko Itsasadarraren paleoinguruneak berritzeko asmoz, azkenengo klimaaldaketaren ondoren sortu zenetik eta glaziazioaren ondoko itsas-mailaren gorakadan zehar, hamaika errotazio-zundaketaren eduki paleontologikoak (foraminifero bentonikoak) aztertu dira. Zundaketa hauetatik bederatzi estuarioaren ubide nagusiko gune okupatueta lortu izan dira, erdiko eta beheko zonaldeetan, eta gainontzeko bi Nerbioi ibaiaren meandro itxi batean, Barakaldo aldean. Lortutako emaitzaz eta lehen aztertutako zundaketen datuetaz baliatuz, Holozenoan zeharreko ingurune-bilakaera berreraiki dugu estuario honi dagokionez. Ingurune-bilakaera hau sedimentu-jarraigoetan antolatuta da, sekuentzia estratigrafikoen interpretazioaren arabera. Erradiokarbonoaren datazioei eta aurrez eginiko lorauts-azterketei esker, zundatzeetan identifikaturiko gertakizun eta paleoinguruneak denboran kokatu ahal izan ditugu. Honela, datu hauen eta Bizkaiko Golkoko beste zenbait eremuetan eskuratutako beste datu batzuen alderaketak azken 8500 urteotan gertatutako itsas-mailaren aldaketen eskema orokorra eta kostaldearen bilakaera berregiteko bide eman digu.

Bestalde, elementu kutsakorrek estuarioaren ekosisteman eragindako talka historikoa aztertzekotan Bilboko Itsasadarreko marea-lautadetan sei zundaketa burutu dira, gune honetan gizakiaren ekarpenen berri eman digutenak. Zundaketa hauen ikerketa mikropaleontologikoa dela bide, sedimentuen erregistro berrietan hiru atal bereiz daitezke. Behekoak, non industrializazioaren aurreko egoera islatzen den. Foraminiferoak ugariak dira eta hondoko maila geokimikoaren metal astunen kopuru beretsua edo txikiagoa ditu ezaugarri. Bigarren eremuak, antzinako industria gunearena da (1850-1950 bitartean). Metalkopuruak handiak izan arren, foraminifero-elkarteak nahiko ugariak izatea onartu zuten. Hirugarren eremuak, egungo industria gunek (1950-2000 bitartean), foraminifero-elkarteen desagertzea du ezaugarri, ziurrenik sasoi honetako oxigeno kopuru txikiak eraginda. Azken biek industriaren aroaren sedimentu-erregistroa osatzen dute.

Amaitzeko, azaleko laginetan eta zundaketa txikietan agerturiko foraminifero bentonikoen kopuruaren eta banaketaren azterketaren bidez, metal astunen azterketa geokimikoen laguntzaz, Bilboko Itsasadarraren gaur egungo inguruneegoera zein den jakin ahal izan dugu. Honez gain, emaitza hauek eremu horretan gizakiaren eraginaren historia berriena berreraikitzeke parada eman digute, sedimentuetan azaltzen den bezalaxe. Ikerketa honek laginketa-sarea eratzeke abagunea ere eman digu, etorkizunean ingurune-berpizketa eta onbideratzearen aurrerakuntzen ebaluazioa egiten lagunduko diguna. Bestalde, Pb-210 eta Cs-137 aztertu dira, ekarpen kutsakorrek eta gertatutako ingurune-aldaketak datatzeko asmotan. Gainera, itsasadarreko marea-lautadetak azaleko laginetan azaldutako foraminifero bentonikoen banaketaren eta gai kimikoen azterketaren bidez azken urteotan jasotako balizko ingurune-hobekuntza ere aztertu izan dugu, bai eta arestian aipaturiko neurri onbideragarriek eragindako ekologia-berpizketa ere.

ABSTRACT

The northeastern coast of Spain is characterized by Mesozoic-Cenozoic sedimentary rocks forming high cliffs interrupted by short, narrow estuaries that are separated from the open sea by sandbars, beaches and dune deposits. The morphology and extent of the different estuarine sedimentary environments are constantly altered by erosion and deposition of sediments, and they are sensitive to even small changes in sea level. The Holocene transgressive episode caused the deposition of large volumes of well preserved estuarine sediments that can be studied to understand environmental and sea-level changes during this interglacial.

The Bilbao estuary was originally the most extensive estuarine area on the Cantabrian coast of northern Spain. The modern estuary is 15 km long, an average of 100 m wide, and its channel depth ranges from 2 m in the upper estuary to 9 m at the mouth. The estuary is formed by the tidal part of the Nervion river, although four other rivers (Kadagua, Asua, Galindo and Gobelás) discharge into the main course. The tidal channel discharges into a wide marine bay called El Abra (average 3.5 km wide; up to 30 m deep). Tides are semidiurnal, with ranges between 4.6 m (spring tides) to 1.2 m (neap tides).

The first iron and steel industry was opened on the middle estuary over reclaimed marshes as early as 1854. Since then, the natural features of the Bilbao estuary have been dramatically modified by urban, industrial and port developments. The exploitation of abundant local iron ore led to the early industrial development of Bilbao in the mid-19th century. The original estuary was rapidly reduced in size through land reclamation to form a tidal channel. This was isolated by dyking from its original intertidal areas, to allow a navigable watercourse from the city to the open sea. Today the Bilbao estuary is a largely artificial system which bears little resemblance to the original estuary. It has been calculated that the total amount of the original estuarine surface lost through human activity is approximately 1,000 ha.

During the last 150 years, the Bilbao estuary has received wastes from many sources (mineral sluicing, industrial wastes and urban effluents) which have significantly degraded the environmental quality of the estuary. At present, the Bilbao estuary is the most polluted coastal area of northern Spain. A significant decrease in the flux of organic matter and heavy metal contaminants has occurred over the last decades, however, due to the implementation of environmental protection policies, the improvement in waste-treatment systems and the closure of some major factories during recent periods of economic recession. Furthermore, estuarine regeneration is currently being undertaken as part of a Revitalization Strategic Plan. Despite these improvements, the unremoved contaminated sediments from the intertidal areas may act as a long-term source of heavy metals to the aquatic environment through sediment mechanical reworking (e.g. dredging, shipping) and oxidation of anoxic sediments. Thus, these pollutants may continue procedures have been implemented.

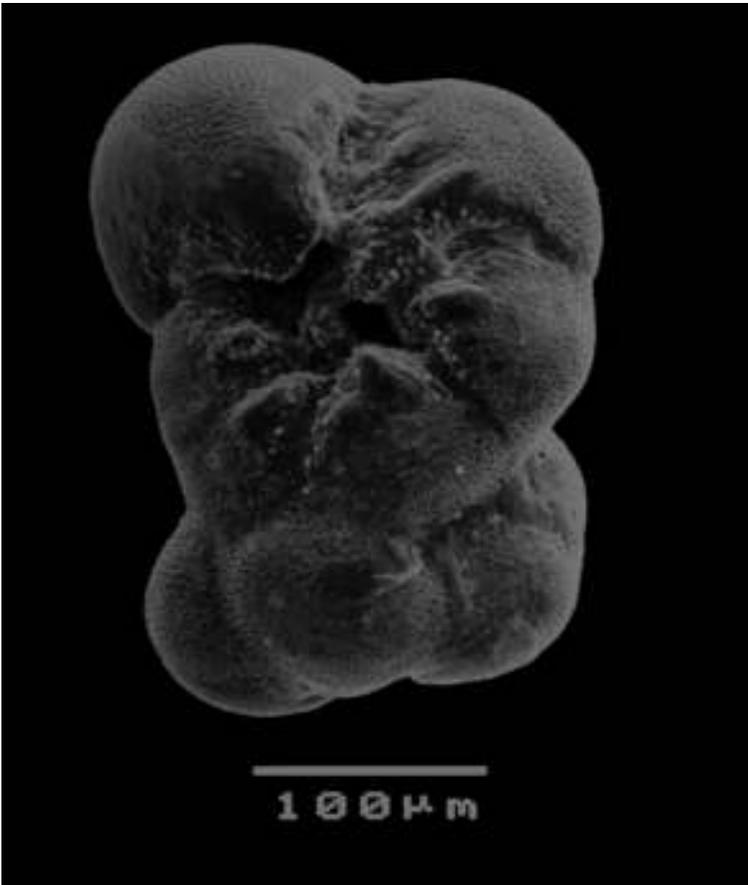
To reconstruct the palaeoenvironmental evolution of the Bilbao estuary since its formation following the postglacial rise of sea level, it has been analyzed the foraminiferal assemblages contained in eleven boreholes taken in the reclaimed areas of the middle and lower parts of the estuary. Integration of these results with similar data from previously studied boreholes has allowed us to reconstruct the environmental development of the Bilbao estuary during the Holocene. This environmental development has been organized into different systems tracts following a sequence-stratigraphic interpretation. Radiocarbon dating and palynological studies helped to locate in time the different palaeoenvironments and depositional episodes identified in the boreholes. Sediments that compose the estuarine infill range from basal fluvial coarse materials (Lateglacial), almost barren of foraminifera, that are interpreted as the lowstand systems tract (LST). This system tract is followed upwards by lower and middle Holocene transgressive materials (TST; 8500-3000 years cal BP), with upper Holocene regressive sediments on top (HST; 3000 years cal BP-19th century). This general sedimentary sequence is best represented in the middle estuarine area, and its sedimentary and microfaunal features are variable depending on its palaeogeographic setting: increasing muddy sediments and absence of open-marine elements are characteristic of the upper estuary, whereas increasing sandy sediments and reworking of the basal fluvial materials are typical of the lower estuary. Comparison of these data with other sedimentary sequences from different coastal areas in the Bay of Biscay allows to reconstruct a general picture of the Holocene sea-level changes and coastal evolution in this area for the last 8500 years.

On the other side, six cores retrieved from the Bilbao estuary tidal flats have been studied in order to evaluate the historical impact of the long lasting record of anthropogenic inputs, which have led to the disappearance of the indigenous microfauna and to the significant pollution of the sediments. Three different zones can be identified in the recent sedimentary record, reflecting initially the preindustrial estuarine conditions with abundant and diverse foraminiferal assemblages and baseline levels of metals, followed by the industrial-period sedimentary record, when high concentrations of metals in the estuarine environment allowed the development of abundant foraminiferal assemblages during the older industrial zone (period 1850-1950) that disappeared during the younger industrial zone (period 1950-2000) due to complete defaunation of the Bilbao estuary caused by minimum oxygen levels during this period. Obtained data provide important information in planning the restoration of the Bilbao estuary, because sediments have proven to be an important storage reservoir for pollutants and microfossils.

Finally, the distribution and abundance of benthic foraminifera (together with geochemical analysis of heavy metals) from surface sediment samples (1997- 2003) and sediment cores collected from the intertidal flats of the Bilbao estuary have been studied to determine recent environmental conditions of this estuary. Furthermore a foraminiferal sampling network has been created in order to evaluate the future progress of the current regeneration schemes on a seasonal and annual basis. Pb-210 and Cs-137 determinations have also been undertaken to provide a chronology for pollutant inputs and ecological changes in the Bilbao estuary.



1. Introducción general



Los foraminíferos presentan morfologías sorprendentes, como se puede observar en esta forma aberrante con dos caparazones unidos.

1.1. Aplicación de los foraminíferos como indicadores (paleo)ambientales

Los foraminíferos (del latín *foramen*, agujero y *ferre*, llevar) son Protozoos, principalmente marinos del grupo de los Rizópodos (Foucault y Raoult, 1985). Su tamaño puede variar desde 0,05 mm a unos pocos cm. Éste es un grupo muy abundante que está presente tanto en los sedimentos como en las rocas sedimentarias y es a su vez muy diverso. Comprende más de 50000 especies fósiles y aproximadamente 5000 especies actuales. Una de las principales particularidades de estos organismos unicelulares, y donde radica su interés para los geólogos, es que presentan un caparazón "biomineralizado" (ver apartado 1.1.b) con un elevado potencial de conservación. La clasificación actual de este grupo está basada en la morfología de dicho caparazón (Loeblich y Tappan, 1988).

Desde el punto de vista biológico, hay que reseñar el hecho de que algunas especies alternan una generación con reproducción sexual con una o varias generaciones asexuales, mientras que otras especies se reproducen únicamente de forma asexual (Murray, 1991). Esta alternancia en la reproducción lleva asociado un dimorfismo en los caparazones, lo que implica que podemos encontrar dentro de la misma especie individuos considerablemente diferentes unos de otros.

1.1.a) Foraminíferos estuarinos como indicadores

El interés de los geólogos por reconocer los estuarios y marismas en el registro fósil radica en que delimitan la posición de la línea de costa. Para los ecólogos, además, representan la transición del medio terrestre al marino (Murray, 1971a).

La idea de utilizar organismos como indicadores (*proxies*) de parámetros ambientales que no pueden ser medidos de otro modo es claramente atractiva para la reconstrucción (paleo)ecológica y (paleo)oceanográfica en detalle (Murray, 2001). En este sentido, los foraminíferos, quizá mejor que otros grupos de microfósiles, pueden usarse como indicadores ambientales por ser organismos simples que no ejercen presión sobre el ecosistema y están gobernados por él (Greiner, 1974). Esto ha permitido que los foraminíferos bentónicos sean utilizados ampliamente como herramienta de reconstrucción paleoambiental gracias a su presencia en un amplio abanico de ambientes, desde aguas salobres someras a las partes más profun-

das del océano, y a su elevado potencial de fosilización, que unido a su considerable abundancia los convierte en buenas herramientas de trabajo (Van der Zwaan, *et al.* 1999). En los estuarios se pueden utilizar para detectar características oceanográficas tales como: masas de aguas, patrones de circulación, influencia de mar abierto, cambios en el nivel del mar y distribución modal de la salinidad (Scott *et al.*, 1980). Además, los foraminíferos bentónicos tienen un gran potencial para operar como indicadores de factores ambientales en dos sentidos: químico y biológico. El sentido químico hace referencia al elemento que es incorporado dentro de la concha (ejemplo: isótopos estables, Cd y Ba como indicadores nutricionales, Mg y Sr como indicadores físicos, etc.) (Lea, 1999). En este caso, no existe una dependencia con respecto al número de caparazones, ya que sólo es necesario que la cantidad de ellos sea suficiente para satisfacer la precisión analítica. En contraste con ésto, el sentido biológico hace referencia a la relación entre la abundancia de un organismo o la composición de una asociación y un parámetro ambiental dado. Aunque los patrones de distribución están controlados por numerosos factores (algunos más importantes que otros a nivel local), los indicadores dependen de una relación bien definida entre la abundancia del organismo, o de la comunidad, y la magnitud de un factor ambiental dado (Murray, 2001). En relación a este uso de los foraminíferos como indicadores, Buck *et al.* (1999) consideran que sólo el análisis de alta resolución de los foraminíferos puede aportar información sobre el origen de los sedimentos y sus paleoambientes asociados, mientras que el análisis de litofacies por sí solo no puede aportar suficientes evidencias para evaluar la historia de los cambios del nivel del mar en el Holoceno.

En contraste con esta utilización de los foraminíferos como indicadores ambientales, Van der Zwaan *et al.* (1999) sugieren que su uso como indicadores está muy limitado a distribuciones relacionadas con la profundidad, el nivel de oxígeno y el flujo de materia orgánica. También consideran que han quedado totalmente obsoletos como indicadores de salinidad y de temperaturas. Estas afirmaciones están dentro de la tendencia actual que considera que las distribuciones de los foraminíferos bentónicos están fuertemente controladas por los niveles de oxígeno y por el aporte de alimentos (Murray, 2001). Pero en la plataforma continental y en los medios marinos marginales también otros factores han demostrado jugar un papel importante

en la distribución de los foraminíferos (Murray, 1991), habiendo sido utilizados con éxito en el establecimiento de curvas del nivel marino y en medios contaminados o con deficiencia en los niveles de oxígeno (Alve, 1990; 1991b; Sharifi *et al.*, 1991). Contrarrestando esta visión limitante del uso de los foraminíferos como indicadores, Scott *et al.* (1995) establecen que el uso de los foraminíferos para monitorizar tendencias históricas de contaminación en medios marinos es una estrategia de investigación bien establecida. Además, el uso de los foraminíferos presenta una serie de ventajas basadas en su gran abundancia y su fácil recolección.

1.1.b) Parámetros de interés (paleo)ambiental en las asociaciones vivas, muertas y enterradas

Ningún organismo ni población de especies existe por sí sola en la naturaleza, sino que siempre forma parte de una asociación de especies que viven juntas en el mismo área (Cearreta, 1986). Una asociación de foraminíferos tiene una serie de atributos que dependen del conjunto de especies que la forman y no de sus componentes individuales: densidad de especies, abundancia relativa de las diferentes especies en la comunidad, predominio de especies oportunistas o estructura de la asociación en términos del tipo de caparazón (Cearreta, 1986). Estos atributos van a variar en función de los cambios ambientales que se produzcan en el medio y, por tanto, las asociaciones estarán formadas por diversas combinaciones de especies que varían continuamente en el espacio y en el tiempo. Pocos medios marinos ofrecen tantos cambios en sus condiciones ambientales como un estuario, y esto se va a ver reflejado en la composición de las asociaciones.

Tinción con Rosa de Bengala. Desde 1952, se han llevado a cabo un gran número de estudios usando el Rosa de Bengala (siguiendo el método definido por Walton, 1952) para distinguir los foraminíferos vivos de aquellos ejemplares que están muertos (Figura 1-1). Se asume que las asociaciones vivas se encuentran en equilibrio con el medio y representan las condiciones de éste (Murray, 1982), mientras que las asociaciones muertas son el resultado de la acumulación a través de la producción y mortalidad de la asociación viva, seguida de su modificación por los procesos *post mortem* de destrucción y transporte.

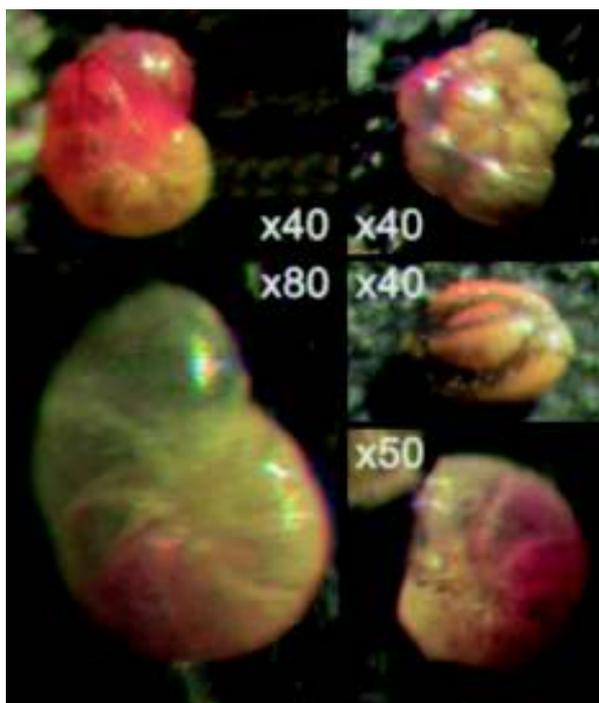


Figura 1-1: Foraminíferos teñidos con Rosa de Bengala en las muestras actuales de la Ría de Bilbao.

Numerosos estudios están basados en la identificación de foraminíferos vivos mediante la tinción con Rosa de Bengala (Van der Zwaan *et al.*, 1999) y está considerado, en general, un buen método para lograr este fin (Bernhard, 1992; Alve y Bernhard, 1995).

Abundancia. La mayoría de los medios marinos intermareales soportan abundancias muy altas de foraminíferos bentónicos, que están relacionadas directamente con la cantidad de alimento presente en ese medio (Phleger, 1976).

Se asume que cualquier medio soporta la mayor abundancia de foraminíferos posible, y que el número de individuos crece o decrece en función de los factores ambientales (aporte de alimentos, competitividad biológica, depredadores o cambios ambientales) (Cearreta, 1986). Además, estudios estacionales de foraminíferos bentónicos en esos ambientes indican una gran variabilidad espacial del número de individuos vivos incluso a distancias muy cortas (Cearreta, 1988).

Por ejemplo, Cearreta (1986) encuentra enormes variaciones de la abundancia (90 cm²) a lo largo de la Ría de Santoña y estacionalmente dentro del mismo punto, variando desde un mínimo de 8 hasta un máximo de 16452 individuos. Es conocido que la distribución de los foraminíferos no es homogénea, sino que se produce en manchas de

tamaños diversos debido a 2 causas principales: la existencia de microambientes y los mecanismos reproductivos (Murray, 1973).

En la Ría de Santoña, la abundancia presenta una clara tendencia, a pesar de su gran variabilidad, con grandes valores en la zona alta, números particularmente altos en la zona media y valores menores en la parte baja del estuario, incrementándose de nuevo en la zona próxima a la boca del estuario (Cearreta, 1986). Este gradiente puede explicarse por la existencia de una “zona de transición” en la zona media del estuario (Scott *et al.*, 1980) donde tiene lugar la interacción entre las influencias marinas y fluviales, creando un máximo de turbidez con grandes cantidades de partículas en suspensión. Debido a ésto, los valores de sedimentación y de contenido en carbono orgánico de esta zona son altos.

Con el fin de facilitar la comparación de las abundancias entre las muestras de los próximos capítulos se propone la clasificación mostrada en la Tabla 1-1, basada en los resultados obtenidos en los Capítulos 2 y 3. La nomenclatura propuesta en esta clasificación ya ha sido utilizada previamente en trabajos previos de la zona (Cearreta, 1992d; 1998; Cearreta y Leorri, 2000; Cearreta *et al.*, 2000; Leorri y Cearreta, 2004), pero en ninguno de estos casos aparecen los rangos equivalentes.

Abundancia	Muy baja	Baja	Moderada	Elevada	Muy elevada
Nº de caparazones/100 gr	<100	<300	<500	<2500	<5000
Nº de caparazones/15 gr	<15	<45	<75	<375	<750
% de exóticos	<20%	<40%	<50%	<60%	<80%
Nº de especies	<5	<10	<20	<25	<30

Tabla 1-1: Categorías de abundancias en función del número de caparazones, del porcentaje de foraminíferos exóticos y del número de especies.

Índice de Diversidad. El concepto de diversidad es originalmente una observación empírica donde, bajo condiciones óptimas, un cierto ambiente presenta el máximo número de especies y ninguna es verdaderamente dominante. Sin embargo, bajo condiciones adversas, algunas especies son capaces de explotar con más éxito este ambiente (Schnitker, 1969). Es obvio que los medios intermareales estuarinos están sujetos a variaciones extremas de las condiciones ambientales en mayor medida que otros medios marinos. Por ello, se puede considerar que los organismos que

viven en condiciones estuarinas lo hacen porque se adaptan bien al medio o porque no pueden competir con sus equivalentes marinos y, por tanto, deben existir donde éstos no se encuentran (Murray, 1963).

Uno de los factores ambientales principales en estos medios estuarinos es el grado de estrés salino, generado como consecuencia de la mezcla de agua dulce y salada dentro del estuario. Este factor vendrá marcado por una reducción de la diversidad específica (con un gran descenso de las especies estenohalinas) y por un incremento en el número de individuos de las especies de foraminíferos eurialinos, típicas de los estuarios (Murray y Hawkins, 1976; Culver y Banner, 1978).

Todas las especies abundantes encontradas en este estudio son bien conocidas y típicas de estuarios y marismas de todo el mundo (Murray, 1973; 1991), apoyando la idea de que unas pocas especies muy adaptables y extendidas ocupan las áreas intermareales (Cearreta, 1986).

La diversidad y la abundancia relativa de las especies en las comunidades están intrínsecamente interrelacionadas con el grado de especialización o generalización de las especies en la comunidad. Las especies generalistas se definen como aquellas que pueden ocupar un amplio rango de ambientes (Matera y Lee, 1972).

La relación numérica entre el número de especies y el número de individuos contenidos en una asociación se define como la diversidad específica de esa asociación. También puede ser un reflejo de los procesos tafonómicos (ejemplo: preservación diferencial) que hayan podido actuar sobre las asociaciones, por lo que es necesario tener en cuenta esta posible pérdida de información original en la interpretación de estos índices. La diversidad específica de los foraminíferos en los estuarios es, en general, muy inferior a la observada en otros medios marinos (Cearreta, 1986).

Debido a que las muestras analizadas no tienen el mismo número de individuos, se han desarrollado diferentes índices de diversidad para poder comparar directamente las muestras entre sí.

El índice α de Fisher fue descrito por primera vez en Fisher *et al.* (1943). Su mayor ventaja es que incluye las especies raras, pero desgraciadamente su valor tiende a incrementarse con el aumento del tamaño de la muestra analizada. Hayek y Bouzas (1997) sugieren que se trata de la mejor opción si sólo se toma una medida univariante, pudiendo calcularse gráficamente según el diagrama de la

Figura 1-2 (Murray, 1973). El número mínimo de individuos necesario para aplicar este índice es de 100, por debajo del cual la composición de las muestras no se considera estadísticamente fiable (Murray, 1971b).

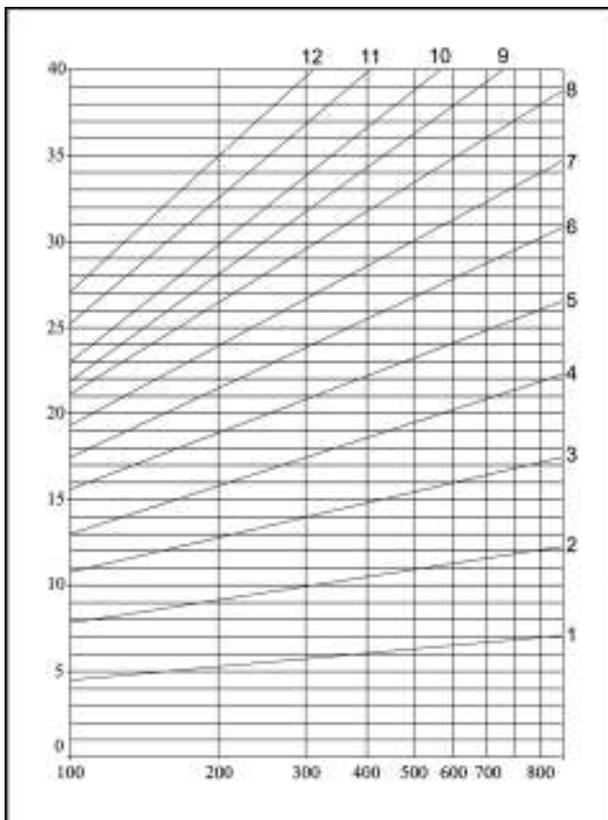


Figura 1-2: Gráfico que permite un cálculo rápido del índice de diversidad α enfrentando el número de especies encontrado en la escala vertical y el número de caparazones extraídos en la escala horizontal (Murray, 1973)

Existe una relación clara entre la diversidad de los foraminíferos y el medio en el que se encuentran. En un sentido general $\alpha=5$ es el límite que separa los medios marinos normales ($\alpha>5$) de los medios confinados ($\alpha<5$) (Debenay, 1987). Por ejemplo, Cearreta (1986) encuentra en Santoña valores que oscilan desde <1 a 3,5 en el estuario superior y desde <1 a 4,5 en el estuario inferior en la asociación viva, mientras que para la asociación muerta los valores oscilan desde 1,5 a 4,5 en el estuario superior y de 1,5 a 10,5 en el estuario inferior.

La diversidad específica sólo debería variar si la composición de la asociación cambia con el tiempo o si existe transporte, destrucción de caparazones o mezcla por bioturbación. Sin embargo, se ha observado que la repetición de muestreos, tomados en el mismo momento, presentan las mismas especies comunes pero difieren en las especies raras (Murray, 2003). También hay que considerar que el

número de especies encontradas en una muestra puede depender de la cantidad de material analizado (Cao *et al.*, 1998).

Es interesante el cálculo de la biodiversidad por diferentes razones. Los cambios en la diversidad pueden ser interpretados como medidas potenciales de eventos estresantes en el medio (por ejemplo, la contaminación que provocaría un descenso en el número de especies) o la recuperación de condiciones adversas (como el final de una fase de una hipoxia severa que favorecería un aumento de la diversidad) (Alve, 1995). También se pueden deber a la introducción de nuevas especies o a cambios climáticos (Murray, 2001). Además es interesante ya que las variaciones de la diversidad permiten la interpretación de estudios paleoambientales, normalmente comparando las asociaciones fósiles con sus análogos modernos. A su vez, para establecer las características de los medios modernos son imprescindibles los datos de series temporales que incluyan el estudio de esta diversidad. Estas series son fundamentales para determinar tanto la variabilidad a corto plazo, como los cambios ambientales producidos a largo plazo (Murray, 2003).

Tipo de caparazón. La naturaleza y estructura de los caparazones actuales de los foraminíferos se utilizan para dividirlos en tres grandes grupos: Aglutinantes, Porcelanáceos e Hialinos.

Los caparazones Aglutinantes (también denominados arenáceos) están compuestos por partículas detríticas aglutinadas con cemento (esencialmente orgánico, pero de naturaleza variable). Estas partículas son mayoritariamente de cuarzo y de tamaño limo, pero esto puede variar en función de la disponibilidad del medio. Este tipo de caparazón es fácilmente reconocible debido a su contenido en partículas detríticas. Los otros dos grupos poseen una pared calcárea, compuesta por carbonato cálcico, principalmente en forma de calcita. La estructura de la pared de los foraminíferos Porcelanáceos está compuesta por pequeños cristales de calcita dispuestos aleatoriamente y recubierta por una fina capa de cristales de calcita romboédrica, con una distribución regular. No presentan poros en su superficie que aparece brillante cuando son observados con luz reflejada y opaca con luz transmitida. Por último, la estructura de la pared de los foraminíferos Hialinos presenta 3 posibles disposiciones: cristales de calcita en una disposición radial, estructura granular o, más raramente, un sólo cristal. Su aspecto es

transparente y vítreo, y todos los ejemplares presentan poros aunque a veces son demasiado pequeños para observarlos con pocos aumentos (Murray, 1979; Debenay *et al.*, 1996).

En medios litorales, la abundancia relativa de estos grupos de caparazones está muy relacionada con la distribución de la salinidad (Cearreta, 1986) y su representación gráfica en diagramas triangulares ha demostrado ser particularmente útil para diferenciar ambientes someros (Murray, 1973). A escala local, aparece un gradiente con la máxima abundancia de caparazones aglutinantes en aguas de baja salinidad, caparazones hialinos en aguas salobres y caparazones porcelanáceos en aguas de mayor salinidad.

Una de las características más notables es la tendencia a pasar de formas aglutinantes en la cabecera, a caparazones carbonatados en la boca del estuario (Weiss, 1976), mostrando la evidencia del control salino en la distribución de las asociaciones de foraminíferos en estos medios. Esto se debe a que la concentración de carbonato cálcico controla la distribución del tipo de caparazón y está relacionada con la salinidad, temperatura y profundidad. Los foraminíferos aglutinantes no tienen restricciones en este sentido, mientras que los hialinos (con un amplio rango de tolerancia) y, especialmente, los porcelanáceos requieren CaCO_3 para la construcción de sus caparazones (Greiner, 1969; 1974).

Similitud (Similarity). Es posible comparar dos muestras diferentes (ejemplo: muestras estacionales del mismo punto, la asociación viva (teñida) y la asociación muerta de la misma muestra, etc.) utilizando el índice de similitud de Sanders (1960). Este índice se calcula tomando los resultados de abundancia relativa (expresados en porcentaje) de cada especie en las muestras a comparar, sumando cada muestra un total de 100%. Se comparan entonces los datos especie a especie, tomando el valor menor de cada especie en común y sumando el total de las especies. Por definición, el valor obtenido será menor de 100% y, en la práctica, valores de >70% indican un alto grado de similitud (Cearreta, 1986).

La asociación muerta. En general, la diversidad de especies de la asociación muerta es mayor que la diversidad de la asociación viva procedente de la misma muestra, excepto en el caso de pérdida de caparazones por procesos *post mor-*

tem, o porque la velocidad de sedimentación sea muy alta. Normalmente esta diferencia se interpreta asumiendo que la asociación muerta representa la acumulación de sucesivas asociaciones vivas a lo largo del tiempo. Esta asociación muerta contiene potencialmente el número máximo de especies que podemos encontrar, aunque algunas puedan ser especies importadas de la plataforma continental como carga de fondo (Murray, 2003), por ejemplo, en el caso de un medio estuarino. Los posibles cambios *post mortem* en las asociaciones incluyen el transporte de caparazones (tanto la pérdida como la mezcla con otros individuos), la destrucción de los caparazones por disolución u otros procesos destructivos, y la mezcla por bioturbación o por falta de sedimentación (asociaciones relictas) (Murray, 1984).

Influencia del sedimento. Aunque la mayoría de las especies de foraminíferos no presentan dependencia del sedimento, es posible hacer una serie de generalidades.

Los foraminíferos pequeños, de pared fina, pueden vivir en las gravas o arenas, pero normalmente no se suelen preservar sus caparazones después de muertos.

Generalmente, los caparazones presentes en estos ambientes de alto nivel de energía son grandes y robustos. Por otro lado, en los sedimentos muy fangosos puede encontrarse un rango muy variable de tamaños, pero muchas de las formas son pequeñas, de pared fina y frecuentemente tienen ornamentos delicados. Este tipo de ambientes son adecuados para el depósito de los individuos pequeños transportados en suspensión por las corrientes (Murray, 1971a). Aunque algunos foraminíferos bentónicos viven en varios tipos de sustrato, otros presentan requerimientos específicos fuertemente relacionados con el tipo de alimentación.

En cualquier caso, para la mayoría de los géneros y especies no hay todavía observaciones directas de su modo de vida, aunque hay algunos ejemplos conocidos (Murray, 1991-Tabla 2.3).

En función de su posición y sistema de fijación respecto al sustrato se puede establecer un clasificación simple (basada en Murray, 1991):

- Epifaunales, que viven en la superficie del sedimento
- Semi-infaunales, formas transicionales entre epifaunales e infaunales
- Infaunales, viven en el sedimento

- Formas de vida fijas, que pueden fijarse de forma permanente (formas sésiles), por ejemplo cementadas y de forma semi permanente, por ejemplo fijos a través de los pseudópodos
- Formas de vida libres

Especies dominantes/secundarias/otras (raras). Se trata de un criterio de clasificación de tipo cuantitativo, según el cual se consideran especies "dominantes" aquellas que presentan una abundancia dentro de la asociación >10%, especies "secundarias" aquellas que aparecen con un porcentaje que oscila entre 1-10% y, por último, "otras especies" aquellas que están representadas en cantidades menores al 1% dentro de cada asociación siguiendo la clasificación utilizada en Cearreta *et al.* (2002b). Sin embargo, también se ha de considerar un parámetro semicuantitativo en esta clasificación, como es la aparición de manera regular de una especie en las muestras estudiadas. Así, se considera más relevante la presencia de una especie que aparece regularmente en todas las muestras, que otra que se presenta puntualmente pero en mayor número, alcanzando la media de ambas un porcentaje similar.

Porcentaje de foraminíferos exóticos. Se trata de un criterio de clasificación de tipo cualitativo, según el cual es posible diferenciar entre especies indígenas o autóctonas (aquellas que viven y se reproducen dentro de los medios estuarinos) y exóticas o alóctonas (aquellas que han sido transportadas desde la plataforma por las corrientes mareales dentro de la cuenca estuarina). Para poder evaluar que especies son indígenas dentro de un área estuarina, es preciso realizar un muestreo estacional a lo largo de todo el estuario, que comprenda como mínimo un año (invierno, primavera, verano y otoño), aunque es recomendable repetir alguno de estos muestreos estacionales para tener en cuenta las posibles variaciones de un año a otro. Es imprescindible utilizar un método para distinguir entre la asociación viva y la asociación muerta, como la tinción con Rosa de Bengala (ver primer punto de este apartado), puesto que el estudio se basa en la distribución de las especies encontradas vivas. El análisis de la abundancia relativa (el porcentaje del número de individuos de cada especie o la relación del número total de individuos) y la frecuencia con la que aparecen en las muestras permiten dividir las en estas dos categorías principales. Considerando especies exóti-

cas aquellas que aparecen siempre como caparazones vacíos y las que a pesar de que aparecen vivas lo hacen irregularmente, principalmente en el estuario inferior y normalmente en porcentajes muy bajos respecto a la asociación viva de cada punto de muestreo, ya que son importadas vivas desde la plataforma continental. Cearreta (1988; Figura 1-3) presenta un estudio en este sentido para la Ría de Santoña.

1.1.c) Técnicas de laboratorio

Las muestras analizadas en los siguientes capítulos son de dos tipos:

a) superficiales, obtenidas presionando un anillo de plástico en el sedimento (40cm²), el centímetro más superficial dentro del mismo es recogido y vertido en un recipiente donde se añade igual cantidad de etanol, para preservar el protoplasma. Este proceso fue repetido 2 veces para obtener un área total de muestreo de 80 cm² (40cm² x2) con el fin de evitar la distribución en manchas característica de los foraminíferos (Murray, 1991) y poder llevar a cabo un estudio cuantitativo.

b) las obtenidas de los distintos sondeos realizados a lo largo de la Ría de Bilbao, tomando diferentes cantidades de muestra y a diferentes intervalos en función del tipo de sondeo realizado (ver capítulos 2, 3 y 4).

En el laboratorio, el contenido del recipiente obtenido en las muestras superficiales fue vertido sobre un tamiz con una luz de malla de 0,063 mm y lavado con agua para eliminar la fracción fina, siguiendo las recomendaciones de Sen Gupta y Machain-Castillo (1993). Este procedimiento se realizó para evitar la pérdida de las especies de foraminíferos de pequeño tamaño conocidas como tolerantes a la hipoxia y los individuos juveniles de las diferentes especies. 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 caparazones vacíos no coloreados (ver apartado anterior). 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 técni-

ca 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 caparazones existentes fueron recogidos y estudiados con un microscopio estereoscópico binocular de luz reflejada.

Por otra parte, las muestras obtenidas de los sondeos fueron secadas en una estufa a 60°C y después pesadas, tomando una fracción similar por muestra en función del tipo de sondeo. Se levigaron con agua a través de un tamiz de 0,063 mm, y posteriormente fueron secadas y pesadas de nuevo, para determinar la proporción de arena, siguiendo las recomendaciones de Sen Gupta y Machain-Castillo (1993). Los foraminíferos fueron concentrados usando tricloroetileno, según la técnica descrita por Murray (1979). Todas las muestras fueron divididas en sucesivas fracciones iguales entre sí, y se recogieron todos los especímenes presentes en una de estas fracciones, ordenados en celdillas numeradas y clasificados.

Estas técnicas de preparación se llevaron a cabo con el mayor cuidado posible para evitar la posible destrucción de los taxones más delicados.

1.2. Trabajos previos sobre foraminíferos en la zona geográfica de estudio

Guillermo Colom puede considerarse como el pionero de los estudios españoles sobre los foraminíferos recientes, especialmente en la costa mediterránea (1935; 1942; 1950; 1964; 1970). Es el mismo Colom quien realiza los primeros trabajos en el litoral del norte de la Península Ibérica (1941; 1952; 1963) y en 1974 presenta un compendio general de sus trabajos en las zonas marinas de la península que se ha convertido en un trabajo de referencia. También son destacables los estudios clásicos en la costa francesa realizados por Le Campion (1968; 1970) en la laguna costera de Arcachon o el realizado por Pujos (1976) en el estuario de la Gironde y la plataforma interna de Aquitania.

Más recientemente, los primeros trabajos en la zona intermareal de Bizkaia son de Bilbao y Lamolda (1979), con datos obtenidos de un muestreo en algunas playas del litoral vizcaíno. Pascual (1981; 1984) realiza un estudio en las playas del litoral vizcaíno y en la Ría de Lekeitio (Bizkaia) (Figura 1-3). Cearreta (1983) analiza las asociaciones de foraminíferos bentónicos de la zona

intermareal de la Ría de Santoña (Figura 1-3). Pascual y Orue-Etxebarria (1985), presentan los primeros datos acerca de los foraminíferos encontrados en la Ría de Bilbao (Figura 1-3).

Cearreta (1986; 1988; 1989) estudia 26 muestras en la Ría de Santoña y 11 en la Ría de San Vicente de la Barquera (ambos en Cantabria; Figura 1-3), con muestreos estacionales (desde el invierno de 1983 hasta el verano de 1985) evaluando las asociaciones vivas y muertas, así como otros parámetros ambientales (salinidad, Ca, Mg, temperatura del agua, tamaño de grano, pH, materia orgánica y CaCO₃). Este estudio revela picos de abundancia absoluta en primavera y otoño, y un proceso reproductivo continuo a lo largo de todo el año, con un ciclo vital de tres meses para las especies *Ammonia tepida* y *Haynesina germanica*. La comparación de sus asociaciones con las de otras áreas adyacentes europeas, indican que estas asociaciones están formadas por especies similares y cosmopolitas. Así mismo, estudia las asociaciones de foraminíferos actuales en San Vicente de la Barquera (Figura 1-3) y su contenido microfaunístico. Este estudio permite dividir en dos categorías las especies encontradas: por una parte, identifica las especies indígenas (que viven y se reproducen dentro del estuario) y, por otra, determina las especies exóticas (transportadas desde la plataforma dentro del área estuarina deposicional).

Pascual (1990; 1992) establece dos amplias zonas en las Rías de Bilbao y Gernika (Figura 1-3), de acuerdo con las asociaciones de foraminíferos presentes: la cabecera bajo condiciones estuarinas y la desembocadura con características marinas. Esta distribución queda trastocada en la Ría de Bilbao, donde sólo encuentra foraminíferos en la zona del Abra, mientras que no encuentra caparazones dentro del canal actual de la ría (Figura 1-6). Asocia esta ausencia de foraminíferos a la gran cantidad de metales pesados y a las condiciones estresantes registradas (pH ácido, elevado hidrodinamismo, grandes variaciones de salinidad, etc). Sin embargo, en la margen izquierda de la zona interior de la bahía (Figura 1-6), con un sustrato limo-arcilloso, encuentra altos porcentajes de *Bulimina elongata subulata*. Considera que esta especie está bien adaptada a las condiciones ambientales presentes, con una elevada concentración en metales pesados.

Cearreta (1992c; 1992d) estudia los depósitos holocenos de Herriko-Barra, en Zarautz (Figura 1-3) y el relleno Holoceno de dos sondeos en zonas

estuarinas: uno situado en la parte media-superior de la Ría de Bilbao, y el otro en la parte baja del estuario del Bidasoa. La sucesión de diferentes ambientes en el relleno y las dataciones obtenidas presentan una secuencia de somerización desde 7819 años BP, interrumpida antes de 2740 años BP con una nueva penetración oceánica, seguida por una nueva secuencia de somerización.

En el estuario del Bidasoa (Figura 1-3), Cearreta (1994) estudia el contenido microfósil (foraminíferos) de dos sondeos largos y encuentra una superficie de solapamiento transgresivo (TOB), separando dos secuencias somerizantes. La secuencia superior presenta una somerización hasta alcanzar las marismas actuales. En la secuencia inferior los depósitos basales se dataron radiométricamente, obteniendo una edad de 7810+130 años BP, y demostrando

que el estuario actual se ha formado desde entonces. Una única datación radiométrica sobre la TOB ofreció una edad de 2740+90 años BP.

Cearreta (1998) estudia las asociaciones de foraminíferos bentónicos presentes en las sucesiones holocenas pre-industriales de la Ría de Bilbao (Figura 1-3), mediante cuatro sondeos perforados en zonas estuarinas ocupadas a lo largo de la ría. 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 secuencias sedimentarias está constituida por *A. tepida*/*H. germanica* que sugiere diferentes medios intermareales, tanto salobres (en asociación con *Criboelphidium oceanen-*

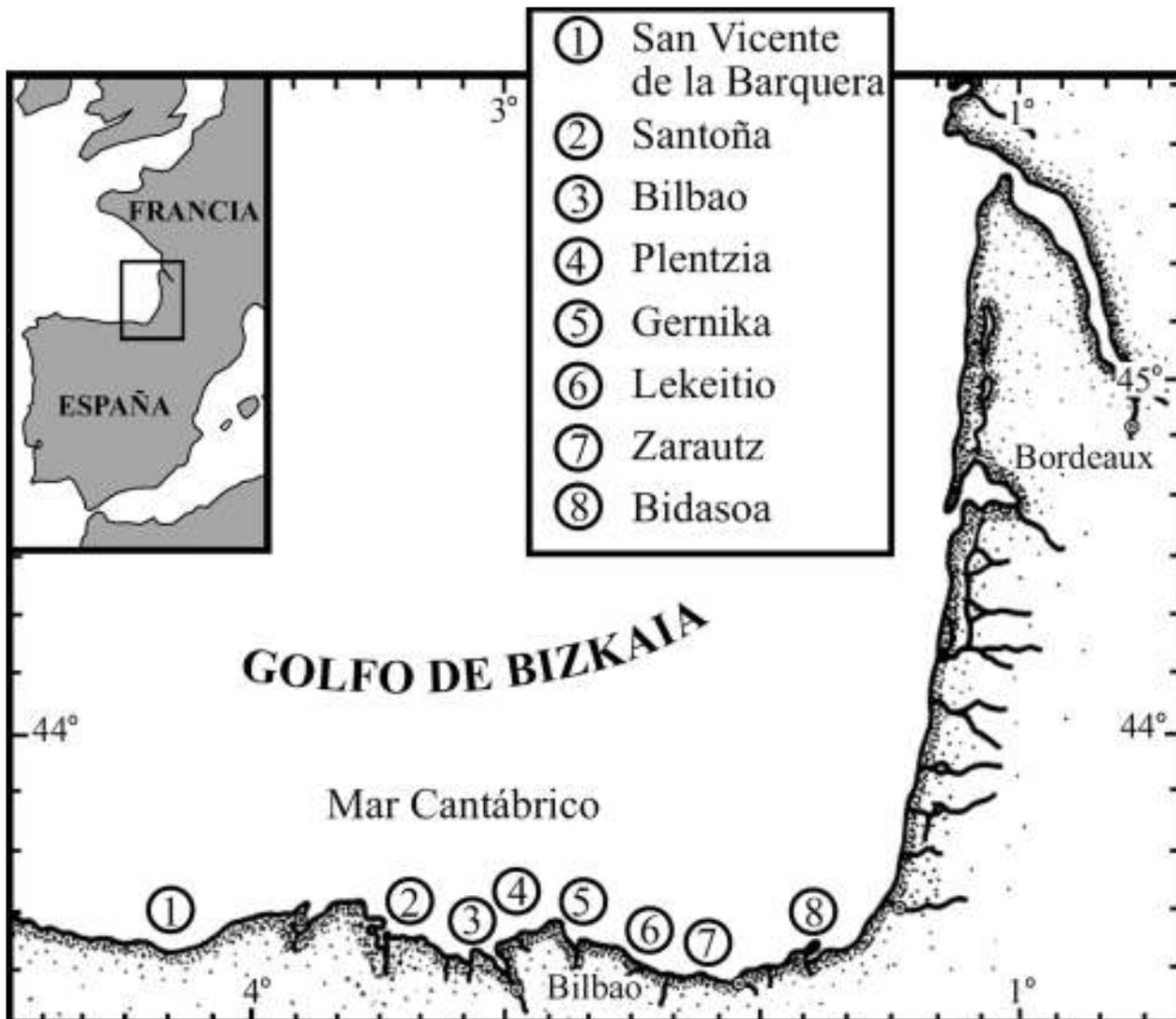


Figura 1-3: Localización geográfica del área de estudio. Los números se refieren a las localidades citadas en el texto.

sis en sedimentos fangosos o con *Criboelphidium williamsoni* en sedimentos arenosos), de salinidad marino-normal (junto con *Brizalina britannica/Bolivina pseudoplicata*), como de marisma baja (en asociación con *Jadammina macrescens/Trochammina inflata/Arenoparrella mexicana*). Por otro lado, la asociación exótica más importante está dominada por *Cibicides lobatulus*, en asociación con taxones epifaunales fijos (*Rosalina spp.*) o con formas de vida libre (*Masilina secans*), todas ellas indicando áreas fuente de mar abierto.

En la Ría de Santoña, Cearreta y Murray (1996) (Figura 1-3) analizan el contenido en foraminíferos de tres sondeos largos y reconocen dos secuencias de somerización (de intermareal marino-proximal a marisma baja), separadas por una superficie de solapamiento transgresivo (TOB). Concluyen que el ascenso relativo del nivel del mar, en este estuario, parece ser escalonado y no continuo.

Dataciones radiométricas efectuadas sobre caparazones de foraminíferos indígenas en diferentes secuencias holocenas a lo largo de la Ría de Bilbao y Santoña (Figura 1-3) presentadas por Cearreta y Murray (2000), indican que el retrabajamiento de los caparazones dentro de las asociaciones en medios de media o alta energía impiden aportar resultados fiables, e incluso en medios de baja energía los procesos de migración de los canales pueden alterar los resultados. Consecuentemente, la validez de las dataciones radiométricas aisladas es cuestionable y proponen la realización de análisis de pares de muestras próximas para verificar su fiabilidad.

Cearreta *et al.* (2000) estudian la composición geoquímica y micropaleontológica de los sedimentos (concentración de metales pesados y contenido en foraminíferos) de 14 muestras superficiales y tres pequeños testigos (50 cm de profundidad), recogidos en zonas intermareales a lo largo de la Ría de Bilbao. En general, el contenido en foraminíferos en los tres pequeños sondeos, reflejan características similares a las asociaciones muertas obtenidas de las muestras superficiales, tomadas en las mismas áreas de muestreo. Una de estas características es la tendencia decreciente en la cantidad de caparazones hacia la zona superior del estuario, con rápidos cambios de abundancia entre muestras adyacentes. Las características sedimentarias, geoquímicas y el contenido en foraminíferos de las muestras superficiales y de los pequeños testigos, indican claramente que las condiciones ambientales en este

área se han mantenido degradadas durante los últimos 40 años (ver Capítulo 4).

Cearreta *et al.* (2002a) estudian seis sondeos recuperados de las llanuras mareales de la Ría de Bilbao, reflejando el extenso y potente registro de los aportes antropogénicos. Estos aportes han provocado la desaparición de la microfauna indígena debido a la significativa contaminación y bajo nivel de oxígeno en los sedimentos. Se pueden diferenciar tres zonas en el registro sedimentario reciente. La zona inferior, en la que se reflejan las condiciones estuarinas pre-industriales, está caracterizada por asociaciones de foraminíferos diversas y abundantes, y un nivel de metales pesados similar o inferior al nivel de fondo geoquímico. La zona intermedia, denominada zona industrial antigua, está caracterizada por altas concentraciones de metales en el estuario que, sin embargo, permitieron la presencia de asociaciones de foraminíferos abundantes. Finalmente, la zona superior o zona industrial reciente está caracterizada por la desaparición de las asociaciones de foraminíferos y la existencia de niveles excepcionalmente altos de metales. Estas dos últimas zonas forman el registro sedimentario del periodo industrial (ver Capítulo 3).

Cearreta *et al.* (2002b) analizan el contenido geoquímico y micropaleontológico de dos pequeños testigos (30 cm y 50 cm) tomados en sendas marismas regeneradas pertenecientes a la Ría de Plentzia (Figura 1-3). Así mismo se analizan muestras superficiales en ambos medios marismesños. Se establecen las diferentes fases de su evolución ambiental reciente, evidenciando la influencia antrópica de su ocupación y posterior abandono.

Pascual *et al.* (1998; 1999; 2000a; 2000b; 2001; 2002) analizan el contenido microfósil y sedimentológico de diez pequeños sondeos (la máxima longitud perforada es de 7,26 m y no se alcanza el sustrato) a lo largo de la Ría de Gernika.

Aquí se pueden distinguir tres fases diferentes en el relleno del estuario. La primera está caracterizada por una mezcla de condiciones marinas y estuarinas, datadas dentro de un rango que va desde más antiguas que 6410+70 hasta 3740+60 años BP. La segunda fase representa un aumento transgresivo que tiene lugar entre 3410+60 y 3250+40 años BP. La fase final está marcada por una activa sedimentación caracterizada por el relleno de los canales estuarinos, el incremento de las marismas vegetadas y el descenso en la diversidad de las microfaunas (foraminíferos y ostrácodos).

Por último, Leorri y Cearreta (2004) analizan las asociaciones de foraminíferos contenidas en las sucesiones sedimentarias de nueve sondeos perforados en el eje principal de la Ría de Bilbao. La interpretación paleoambiental de estas asociaciones encontradas y de otras estudiadas previamente en esta misma ría, definen el relleno sedimentario de este estuario como una secuencia deposicional eustática de cuarto orden. Esta secuencia sedimentaria se organiza en tres cortejos sedimentarios. Gravas y arenas de grano grueso de origen fluvial con ausencia casi total de foraminíferos componen el cortejo de nivel del mar bajo-LST (Tardiglaciario). Durante la transgresión marina (cortejo sedimentario transgresivo-TST, 8500-3000 años cal BP) se depositaron grandes volúmenes de sedimento. En el estuario inferior estos materiales muestran principalmente un carácter marino-proximal, mientras que en la zona media los sedimentos presentan intercalaciones entre materiales salobres y marino-proximales, y en la zona superior del estuario sólo se depositaron materiales salobres. El siguiente cortejo sedimentario de nivel de mar alto (HST) depositado durante el Holoceno superior (desde 3000 años cal BP hasta la ocupación humana del siglo XIX) se caracteriza por unas condiciones intermareales y supramareales salobres correspondientes a un relleno posterior a la estabilización del nivel marino.

1.3. Características ambientales de la Ría de Bilbao

1.3.a) Contexto geológico y geográfico

Geológicamente, la Ría de Bilbao se sitúa en el flanco S del Sinclinorio de Bizkaia dentro de la Cuenca Vasco-Cantábrica (Figura 1-4). Posiblemente, la ría se originó como consecuencia de la denominada Falla de Otxandiano, que provocó una neta diferencia entre los materiales más jóvenes de la margen derecha, representados por Cretácico superior y Paleógeno, y los más antiguos de la margen izquierda, de edad Cretácico inferior. La ría transcurre paralela a la dirección de las fracturas, sobre margas albienses de poca consistencia, lo cual ha determinado que el río excavase un profundo valle que se prolonga y ensancha en el Abra (Hernández Pacheco, 1966). Además de estas margas, podemos encontrar que la ría también atraviesa areniscas alternando con limos en facies flysch, sobre los que reposan en algunos tramos pizarras sedimentarias con intercalaciones de areniscas. En la entrada de la ría aparecen unos niveles eruptivos de tipo ande-

sítico basáltico, que han fluido a través de las citadas fracturas (Rivas, 1991).

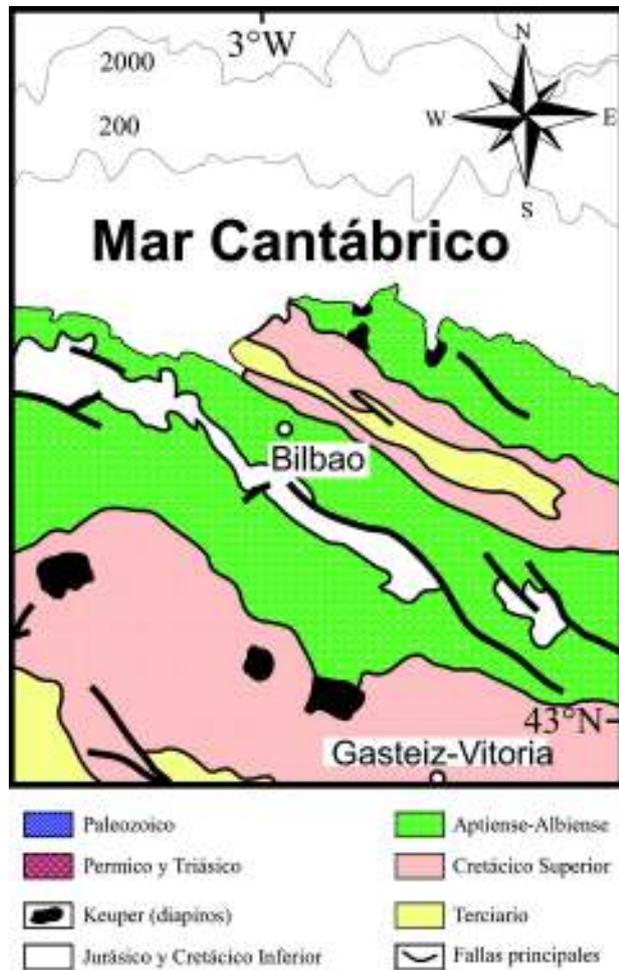


Figura 1-4: Mapa geológico de la cuenca fluvial del Nervión-Ibaizabal (cedido por López-Horge). Se pueden observar los materiales correspondientes a la Cuenca Vasco-Cantábrica y la orientación general (NW-SE) de las estructuras geológicas.

Un estuario puede ser definido como una masa de agua litoral semiconfinada, que presenta una conexión directa con el mar abierto y en cuyo interior el agua marina es diluida con agua dulce proveniente del drenaje continental (Pritchard, 1967). La costa norte de la Península Ibérica se caracteriza por presentar un típico litoral con rías, donde se encuentran numerosos estuarios separados del mar abierto por barras arenosas o depósitos de playa. Las rías se forman en la estrecha zona de transición entre el dominio marino y el dominio continental y su vida es generalmente corta en términos geológicos. Su morfología y extensión están siendo constantemente alteradas por la erosión y la deposición de sedimentos, y se ven drásticamente afectadas como resultado de pequeños ascensos y descensos en el nivel del mar. Actualmente, tras los

episodios glaciares pleistocenos que profundizaron los valles fluviales, la posterior transgresión holocena que los inundó ha supuesto la colmatación de las rías hasta el nivel de las aguas con material sedimentario de origen diverso, tanto de procedencia marina (aportado por las corrientes mareales) como depositado por el río que ha excavado el valle. Este depósito transgresivo va a cubrir el lecho así como las formaciones sedimentarias originadas por el río durante la regresión anterior. Finalmente, se obtiene una topografía plana formándose llanuras de fango (mudflats), llanuras de arena (sandflats) y marismas vegetadas (marsh) (Cearreta, 1992a).

La Ría de Bilbao, que fue originalmente el área estuarina más extensa de la costa Cantábrica (Hazera, 1968), se localiza en el borde S del Golfo de Bizkaia entre las coordenadas latitud 43°23'N-43°14'N y longitud 3°07'W-2°55'W (Figura 1-5) y está formada por el tramo final de la cuenca de los ríos Nervión e Ibaizabal, que a su vez está situada en la Comunidad Autónoma del País Vasco (principalmente Bizkaia, aunque también Alava y Burgos).

Su principal característica es la de presentar una fuerte pendiente media, debida a la escasa longitud de su recorrido y a la gran diferencia de cotas entre su nacimiento y el nivel del mar. Es una cuenca joven, estrechamente controlada por factores litoestructurales, principalmente fracturas (Cruz-Sanjulian *et al.*, 1984). Los principales ríos de esta cuenca son el Nervión y el Ibaizabal, ambos con un caudal similar. El río Nervión alcanza una longitud de 78 km desde su nacimiento hasta la desembocadura en el mar Cantábrico, mientras que el Ibaizabal recorre 48 km desde su nacimiento hasta que se une con el río Nervión en Ariz. Sus principales afluentes desembocan directamente en la Ría de Bilbao. De ellos, el Kadagua es el mayor, alcanzando los 67 km de recorrido, mientras que el Galindo, Asua y Gobelas presentan recorridos inferiores a los 15 km (Irabien, 1992).

El clima que afecta a esta cuenca puede considerarse oceánico templado, superando la pluviometría anual los 700 mm/m². Se caracteriza por presentar inviernos suaves y veranos frescos. A pesar de que el reparto de lluvias suele ser regular, cuan-



Figura 1-5: Mapa de localización geográfica del área de estudio dentro del Golfo de Bizkaia. La plataforma continental cantábrica está caracterizada principalmente por su pequeña anchura. En lo que respecta al País Vasco, oscila entre los 7 km frente al Cabo Matxitxako y los 20 km frente a Orío. Anchura mínima si la comparamos con las dimensiones de la vecina plataforma de Aquitania, que alcanza valores comprendidos entre 60 y más de 200 km. Su trazado E-W sigue aproximadamente la morfología de la costa, presentándose fracturada y rectilínea. A partir de los 200 metros de profundidad se registra una pendiente abrupta (10 a 30%), con cañones submarinos muy encajados y, a menudo, oblicuos en relación con la dirección general del margen.

do las precipitaciones diarias rebasan los 130 mm/m² se producen desbordamientos de carácter catastrófico (IGME, 1986). Estos episodios tienen como consecuencia directa una importante removilización de sedimentos por acción de los fuertes arrastres de los materiales depositados en el lecho del río (Irabien, 1992).

En esta zona geográfica las mareas son semi-diurnas, con amplitudes que varían aproximadamente cada 14 días, desde 4,60 m en mareas vivas hasta 1,20 m durante las mareas muertas (estuario mesomareal). En una marea muerta el volumen de agua marina que penetra en el interior de la Ría de Bilbao es del orden de 2-2,5 millones de m³, mientras que durante una marea viva entran aproximadamente 7-7,5 millones de m³; es decir, 3 veces más. Es interesante comparar estos datos con la cifra de 1 millón de m³ que, en condiciones de estiaje, aportan diariamente los principales tributarios del estuario. La calidad química del agua está condicionada por la gran cantidad de efluentes domésticos, mineros e industriales que han sido vertidos, tanto directamente en la ría como en sus distintos tributarios. Así, la Ría de Bilbao representa el punto de la Cornisa Cantábrica donde la contaminación antrópica ha alcanzado sus niveles más altos (Greenpeace, 1991).

Como hemos visto, el sistema de la Ría de Bilbao está formado por el curso bajo del río Nervión, sometido a la influencia de las mareas, junto con la zona de bahía, denominada El Abra. Se extiende durante 23 km desde la zona de bahía exterior (Punta Lucero) hasta la cabecera del estuario (en Atxuri), y excepcionalmente penetra hasta La Peña (1 km más arriba) (Figura 1-6). El conjunto adquiere en planta forma de embudo, con un Abra muy ancho en la zona exterior, que se va estrechando progresivamente hasta la zona de cabecera de la ría (Rivas, 1991). El valle que rodea a la ría está constituido por una serie de cumbres que presentan una altura media de 180 m en la margen derecha y de 320 m en la margen izquierda. El tramo de la ría que va desde la cabecera hasta la desembocadura es actualmente un canal en parte navegable, de anchura variable que oscila entre los 50 m en la zona más superior (La Peña y Casco Viejo), 60 m y 90 m según descendemos en la zona superior, 95 m y 145 m en la zona media y 125 m en la zona inferior, siendo modelado antrópicamente por los continuos dragados y diversas obras de canalización. Apartir de aquí, se extiende El Abra

cuya anchura alcanza valores de 1800 m en su zona interior, 2500 m en la zona intermedia y 3800 m en El Abra exterior. En cuanto a su profundidad actual, la columna de agua varía desde 2 m a 5 m en la zona superior, alcanza los 8 m en la zona media, 9 m en la zona inferior, 14 m en el Abra interior y 30 m la zona más exterior de la bahía (Consorcio de Aguas, 1989; ITSEMAP S.A., 1990).

En la cabecera de la ría (La Peña) (Figuras 1-6 y 1-7), nos encontramos un meandro fuertemente encajado en calizas urgonianas. Aguas abajo, la corriente fluvial forma una cubeta casi circular de unos 2 km de diámetro (desde Atxuri hasta Olabeaga), donde se ha construido la actual ciudad de Bilbao. Este segundo meandro presenta un recorrido del río más amplio, como consecuencia de la naturaleza margosa del sustrato (Hazera, 1968). El trazado rectilíneo actual de la ría en su zona media (Figuras 1-6 y 1-8) se debe a un acortamiento reciente de su curso, al abandonar el meandro que el Nervión había modelado alrededor de Barakaldo, cuya morfología característica se ha conservado muy bien (ver Capítulo 2). Desde el meandro abandonado de Barakaldo, el trazado continúa casi rectilíneo hasta la desembocadura de la ría en El Abra.

En los mapas más antiguos se observa que, al menos durante la bajamar, quedaba al descubierto una considerable extensión de playas, cordones de arena en la embocadura del Abra, marismas y bajíos, con varios canales, debido al aporte de aluviones por el río y al material introducido por las mareas (Figura 1-9). Las arenas arrastradas por las corrientes de marea tendían a depositarse en el margen derecho de la desembocadura de la ría formando un arenal (Getxo). Así, éste constituía ya en el siglo XVIII un arenal emergido de grandes dimensiones, aunque surcado por múltiples canales de entrada de marea. Este primitivo arenal, sobre el que se situaban las históricas casas del Consulado (ver apartado 1.3.b), ha sido totalmente ocupado por la urbanización de Las Arenas (Rivas, 1991). Esta posición de los acúmulos arenosos es consecuencia natural de la alineación general E-W que presenta la costa y de la dirección NW dominante de los vientos y mareas. En la costa cantábrica es un hecho característico que las desembocaduras de los estuarios tiendan a situarse hacia el lado occidental y, por consiguiente, que los depósitos de arena que constituyen las playas contiguas estén principalmente localizadas al E de la desembocadura (Cearreta, 1992a).

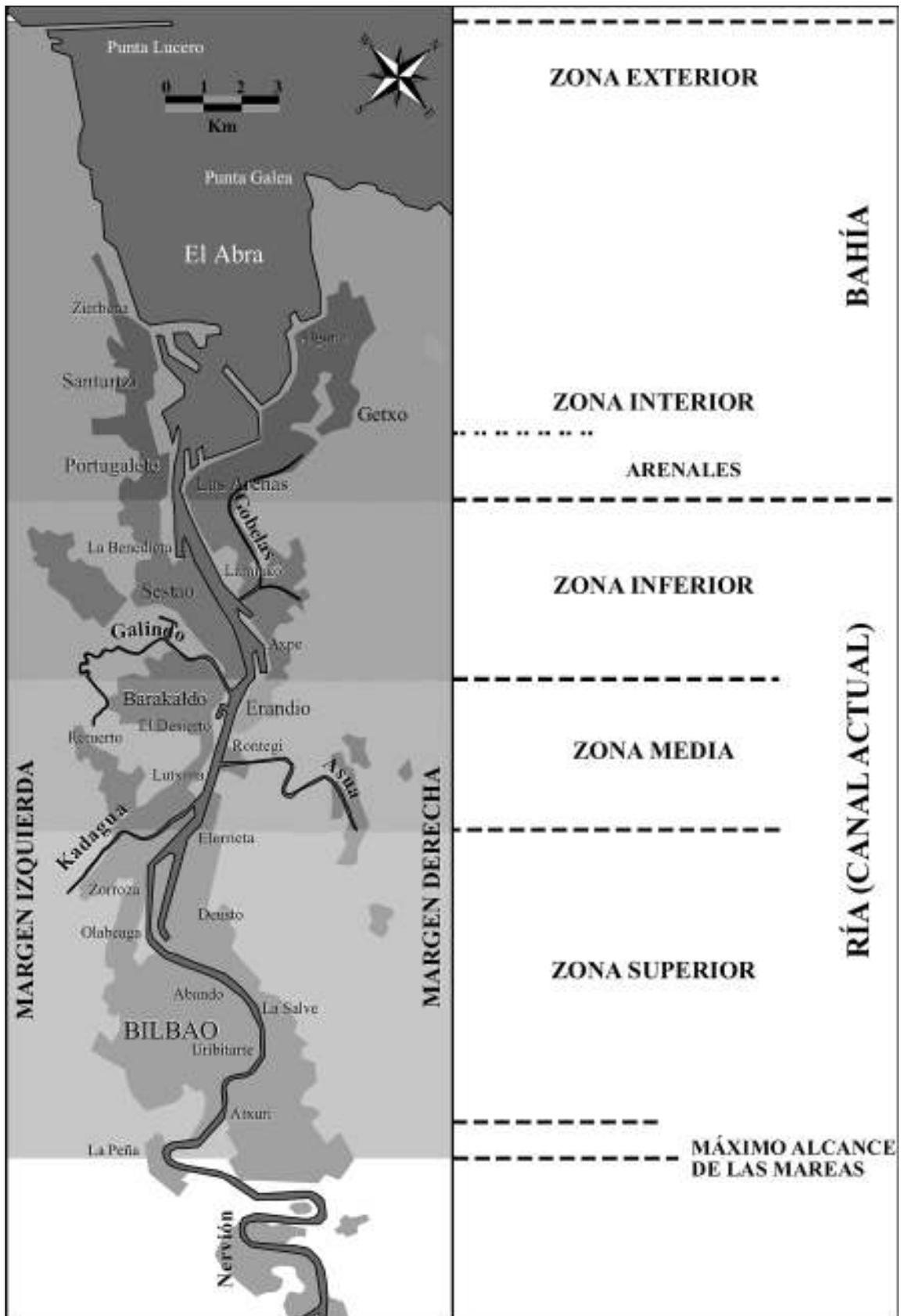


Figura 1-6: Ubicación geográfica de las localidades mencionadas en el texto. Las superficies sombreadas en gris claro son las áreas urbanas. El gris oscuro indica la ría y el mar. Además, en diferentes tonos de grises se presenta una división por zonas de la Ría de Bilbao. Esta división está basada en los resultados del análisis micropaleontológico obtenidos en Cearreta (1998), Cearreta y Murray (2000) y Cearreta *et al.* (2000; 2002a).



Figura 1-7: Vista de la curva que traza el cauce fluvial en La Peña antes de convertirse en ría.



Figura 1-8: Vista aérea del trazado de la ría desde Bilbao hasta la desembocadura.



Figura 1-9: Como se puede observar en este cuadro del año 1740, la desembocadura de la ría presentaba de manera natural grandes extensiones de arena, que incluso llegaban a cerrar la salida con la formación de la barra de Portugalete.

Las mismas corrientes y mareas que dieron lugar a los grandes arenales de Getxo, formaron la barra de la desembocadura (próxima a Portugalete) (Figura 1-9) que cerraba la salida de la ría con un banco de arena inestable sujeto a fuertes desplazamientos (García Merino, 1981). La margen izquierda del Abra, caracterizada actualmente por materiales finos arcillosos y limosos (Pascual y Orue-Etxebarria, 1985), ha presentado siempre mayores profundidades que la margen derecha que se caracteriza por materiales sedimentarios de mayor tamaño de grano (ITSEMAP S.A., 1990).

1.3.b) Transformación histórica de la Ría de Bilbao¹

La Villa de Bilbao fue fundada el 15 de Junio de 1300 por el Señor de Vizcaya, Don Diego López de Haro. Sobre una antigua población creó una villa de condiciones jurídicas particulares, que le permitieran explotar las posibilidades portuarias de la ría (Figura 1-10).

La Naturaleza proporcionó a Bilbao 2 elementos fundamentales para su desarrollo: el mineral de hierro como materia prima y la ría como puerto natural, y ambos fueron explotados hasta el límite de sus posibilidades.

La ría que hoy conocemos es una creación completamente artificial. Se encuentra prisionera entre diques que encauzan y modifican todo su recorrido. Sus fondos son continuamente excavados por las dragas, ha cedido la mayor parte de sus dominios a la industria, y ni siquiera sigue su trazado inicial, que en todas partes ha sido retocado, rectificado o desviado para adaptarlo a las exigencias de la navegación (García Merino, 1981). No es frecuente encontrar una explotación tan intensa de un recurso natural que originalmente no presentaba unas condiciones adecuadas para su utilización, pero sobre el que se ha llevado a cabo una enorme labor de transformación antrópica.

La enorme alteración física de todo este espacio ha sido consecuencia del proceso de transfor-

¹ **Nota del autor:** este apartado está basado en la estructura y contenidos de Cearreta 1992a y 1992b.



Figura 1-10: Reconstrucción pictórica que representa la ría hacia el año 1300 y donde se puede apreciar Bilbao antes de su fundación como Villa.

mación económica de Bilbao, desde una villa pre-industrial de pequeñas dimensiones situada en la cabecera del estuario (Figura 1-10), hasta una ciudad industrial de grandes dimensiones proyectada en torno a la ría (Figura 1-8). Así, el comercio tradicional con la lana de Castilla aseguró la vitalidad económica de Bilbao hasta el siglo XIX. Apartir de ahí, la ciudad encontró una nueva orientación económica basada en la minería del hierro y su industria siderúrgica asociada, actividades que han caracterizado su transformación ambiental en los siglos XIX y XX.

La ría, cuando se funda la Villa de Bilbao, lejos de estar encauzada como ahora, se extendía durante las pleamares por las vegas que se asentaban a ambos lados de la misma, desde El Arenal (en Bilbao) hasta las marismas de Getxo.

Consecuentemente, su régimen era más variable que en la actualidad: las grandes avenidas alteraban el curso del canal y acumulaban en la ría bancos de grava y arena, de modo que los buques que entraban por ella después de salvar el obstáculo principal de "La Barra" exterior que se formaba en la desembocadura (próxima a Portugalete) (Figura 1-9) y cuya profundidad no superaba el metro en bajamar equinoccial (Rivas, 1991), se encontraban con otra acumulación de arena,

menos peligrosa, generada por la bifurcación del canal en el tramo inferior. Marchando uno de los brazos arrimado a la margen derecha (por las antiguas playas y marismas de Lamiako) y el otro por la margen izquierda (por la playa de Sestao). Tampoco faltaban otros bancos en los ensanches de las zonas media (vegas de Erandio y Barakaldo) y superior (vegas de Deusto, Olabeaga y Abando). En época histórica la profundidad en bajamar equinoccial de Bilbao a Olabeaga no superaba los 2 m, con extensos tramos de 1,5 m (Rivas, 1991) que contribuían a que sólo fuera posible la navegación dentro de la ría durante las pleamares, y únicamente en mareas vivas para los mayores buques. A pesar de su gran importancia para la navegación, la Ría de Bilbao siempre ha presentado problemas de calado.

En 1502 se propone la desviación del río Gobelás, que serpenteaba por las dunas arenosas móviles situadas en la margen derecha de la desembocadura, alterando su curso con frecuencia y arrastrando hacia la ría gran cantidad de arenas que se creían responsables del origen de la barra que cerraba la desembocadura y de los bancos de arena de la zona inferior de la ría. Se pretendió alterar su curso haciendo que desembocara directamente en el mar, pero esta desembocadura arti-

ficial se cerró definitivamente en 1772, debido a la arena aportada por el mar, volviendo el Gobelás a desembocar de nuevo dentro de la ría. Desde entonces, la fijación de las dunas por la vegetación y las construcciones efectuadas han hecho que su cauce sea estable y que el sedimento que arrastra actualmente hacia la ría sea mínimo.

Consulado de Bilbao. El 22 de Junio de 1511 a solicitud de la villa, los reyes de Castilla aprobaron la creación del Consulado de Bilbao, institución que materializó durante más de 300 años el control de Bilbao sobre la ría.

A finales del siglo XV y comienzos del XVI, la tendencia natural de la ría era desembocar arrimada a la costa rocosa de la margen izquierda (entre Portugalete y Santurtzi). La corriente generada en la desembocadura, los cambios en la dirección del viento en esta zona y las rocas del litoral hicieron pensar como primera necesidad, en el segundo tercio del siglo XVI, la construcción del muelle en esta margen para que provocara una mayor estabilidad y profundidad en la corriente que se abría a través de la barra arenosa allí formada. Sin embargo, la baja calidad del material utilizado obligaba a constantes reparaciones de este muelle y a una consecuente reducción de su efectividad.

En la margen derecha, los arenales presentes frente a la bahía (en Getxo) estaban en continuo movimiento por la acción de los vientos que introdu-

cían arena hacia el interior (hasta las colinas de Ondiz) y hacia la desembocadura de la ría. Con el fin de detener este movimiento arenoso, el Consulado de Bilbao construyó el muelle de la margen derecha, que fijaba la arena en la parte protegida del muelle generando un aumento de la playa conforme iban creciendo y alargándose los muelles. Por esta razón, y por no haber prolongado suficientemente el muelle de la margen izquierda, los resultados obtenidos fueron poco eficaces, ya que donde acababan los muelles la corriente se arrimaba nuevamente hacia la costa rocosa formando un canal sinuoso y de peligrosa navegación. Los muelles construidos sólo servían para ayudar a las corrientes vaciantes de la ría a abrir un cauce más rectilíneo, que aunque a veces formaba un canal en El Abra interior en dirección N, éste se cerraba rápidamente debido a las marejadas que volvían a arrimar el canal de la desembocadura hacia las rocas de la costa izquierda.

El emplazamiento de la villa también ofrecía inconvenientes al quedar ésta sujeta a las violentas pulsaciones del río que se convertían en graves inundaciones. Tres o cuatro veces cada siglo, estos "aguaduchos" sacaban los barcos de la ría y provocaban enormes destrozos en las calles de la villa. Para liberar a Bilbao de las frecuentes y trágicas inundaciones que padecía, en el año 1654 el Consulado abrió un nuevo cauce en la zona superior formando, como consecuencia, una pequeña isla que desapareció al cerrarse el cauce original en 1870 (Figura 1-11).

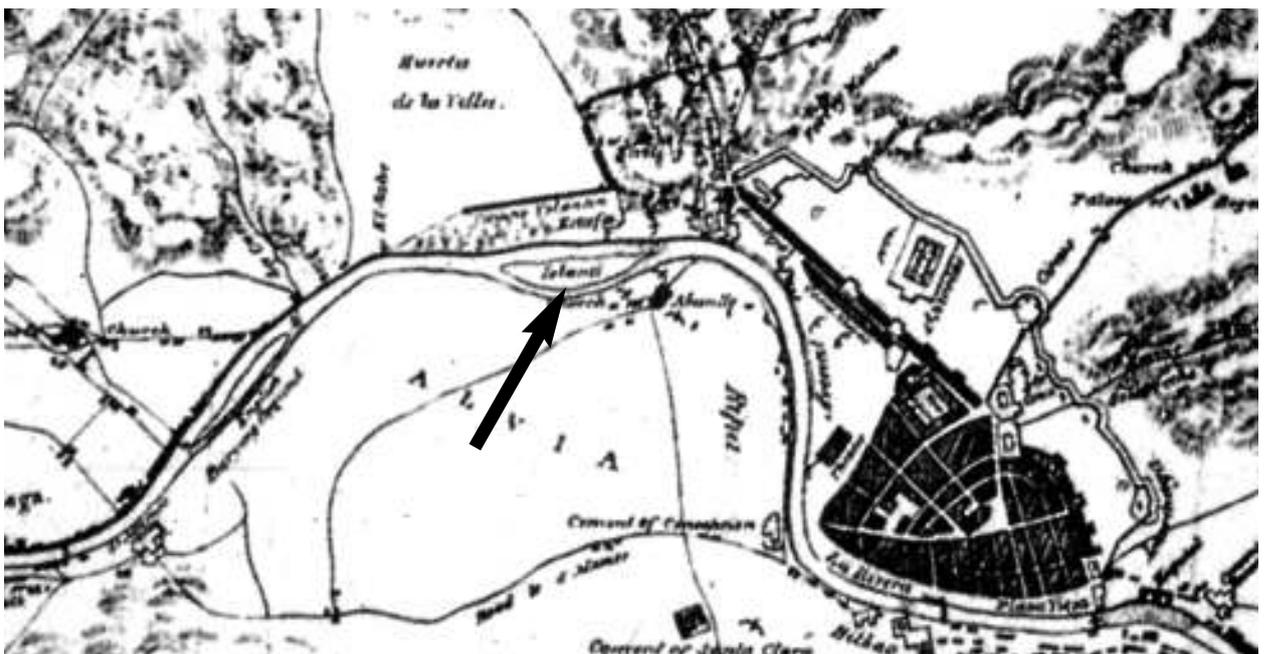


Figura 1-11: Mapa del s. XVII. La flecha señala la desaparecida isla de Uribitarte.

En 1753 se decidió encauzar la ría en su zona inferior y parte de la zona media (desde Portugalete hasta El Desierto), donde el estuario ocupaba una vasta superficie, quedando en bajamar dos canales tortuosos y de poca profundidad. Este encauzamiento supuso la construcción de muelles en ambos márgenes. Todos estos trabajos fueron acompañados de dragados, con el fin de aumentar los efectos del encauzamiento. Esta obra produjo la apertura de un único cauce rectilíneo de mayor profundidad, que hizo desaparecer la barra interior y los dos brazos de la zona inferior de la ría. Sin embargo, la construcción de estos muelles provocó la acumulación de sedimentos y la colmatación de este tramo hasta las proximidades de la desembocadura. Para evitar este hecho, en 1783 se profundizó artificialmente esta zona con el objetivo de que entraran las corrientes mareales hasta la mitad de la zona inferior (Sestao), pero la vega de la margen derecha se colmató completamente (Lamiako).

El Consulado de Bilbao fue disuelto en 1844, dejando canalizada la mayor parte de la ría con una extensión de 21 km de muelles que habían sido construidos durante los 3 siglos anteriores (Figura 1-12). Estas obras mejoraron bastante las condiciones del cauce de la ría, tanto para la navegación como para la evacuación de las grandes avenidas fluvia-

les. Sin embargo, los éxitos del Consulado en la desembocadura de la ría en El Abra no fueron duraderos, ya que a finales del siglo XIX aún existía el banco arenoso que formaba la barra de la desembocadura (La Barra de Portugalete).

Desde 1875 hasta 1877 se concedió a una serie de empresas privadas el encauzamiento de la margen izquierda de la ría, entre los ríos Kadagua y Galindo, con el fin de realizar las terminales de ferrocarril e instalar cargaderos para el mineral que estaba siendo explotado tierra adentro por estas mismas empresas. Además, ahí se asentaron 3 grandes establecimientos industriales de fabricación de hierro y acero.

Junta de Obras del Puerto de Bilbao. En 1877 se constituye la Junta de Obras del Puerto de Bilbao, a la cabeza de la cual fue nombrado Evaristo de Churrua (Figura 1-13). En esa época los principales inconvenientes que presentaba la ría eran los siguientes:

- 1) la movilidad y escasa profundidad de la barra de la desembocadura, que no superaba 1 m en bajamar.
- 2) una curva presente en el tramo inferior (Axpe) donde se encontraba un peligroso bajo de roca.



Figura 1-12: Plano general de la Ría de Bilbao en el año 1877, realizado por la Junta de Obras del Puerto. En el cuadro inferior izquierdo se observa la zona del Abra.

3) una violenta curva presente entre los tramos medio y superior (Elorrieta) y por donde sólo podían pasar buques pequeños.

4) los altos fondos que ocupaban una extensión de 1 km en la zona superior (Olabeaga-Bilbao), formados por una masa de cantos rodados de origen fluvial que se elevaban por encima del agua más de 1 m en bajamar.

5) la falta de profundidad en casi toda la ría y las extensas playas de sus márgenes, que se descubrían en bajamar y donde varaban muchas embarcaciones.

La solución a los problemas de la mitad inferior de la ría se consideró más urgente, ya que los 5 ferrocarriles mineros de la época llegaban a esa zona a descargar mineral, teniendo lugar ahí el principal tráfico del puerto. El estado de la barra de la desembocadura y de la ría en general creaban consecuentemente grandes inconvenientes al comercio. Asimismo, el posterior aumento de los recursos económicos de la Junta posibilitó la mejora de las condiciones en la mitad superior de la ría.

El análisis químico y el examen microscópico de las arenas que se depositaban en la desembocadura de la ría, demostraron a Churruca que éstas estaban compuestas fundamentalmente por fragmentos carbonatados biogénicos de origen marino local. Estas arenas, que se acumulaban inicialmente en una gran playa de la margen derecha (Las Arenas) debido a la acción del oleaje, eran posteriormente arrastradas por las corrientes mareales hacia la desembocadura de la ría, formando así los bancos de arena que constituían la citada barra. Gran parte de esta arena se depositaba en la zona interior del muelle de la margen derecha, formando un banco arenoso, y el resto entraba en el interior de la ría depositándose en una ensenada en la zona inferior y en el cauce del estuario, sin llegar a remontar más de 3 km aguas arriba. La corriente mareal vaciante volvía a arrastrar parte de estas arenas de nuevo hacia la desembocadura donde eran otra vez atrapadas por el oleaje y transportadas hasta la playa (Junta de Obras del Puerto, 1910). Por tanto, se trataba de un banco arenoso formado como consecuencia de las corrientes marinas, que describían en El Abra interior un círculo cerrado. Los vientos dominantes del NW orientaban las corrientes de marea empujando los sedimentos arenosos marinos hacia el SE, generando la playa de la margen derecha, antiguamente mucho más extensa. De ahí la corriente se desviaba hacia el SW, prolongando el cordón litoral de arena a través de la desembocadura de la ría y tendiendo a



Figura 1-13: Evaristo Churruca, Ingeniero Jefe de la Junta de Obras del Puerto.

cerrarla. Las corrientes mareales de flujo y reflujo de la ría mantenían su boca abierta, empujando la arena hacia el interior del Abra y extendiendo consiguientemente los bancos de arena mar adentro. Ahí las corrientes del NW volvían a capturar este sedimento comenzando de nuevo el ciclo (Hazera, 1977). Como resultado de este proceso, la barra de la desembocadura exhibía grandes fluctuaciones en longitud, anchura y altura.

A partir de estos estudios del material sedimentario de la barra y del estudio de los regímenes de vientos y corrientes, Evaristo de Churruca concluyó que para abrir un paso permanente y seguro a través de la barra de la desembocadura, era preciso favorecer esa tendencia natural de la corriente estuarina, prolongando el muelle de la margen izquierda hacia el exterior, hasta pasar los bancos arenosos con una ligera curvatura que volviera su concavidad hacia el cauce (Figura 1-14, Figura 1-5), con el fin de dirigir la corriente en dirección N y evitar así las marejadas del NW y la prolongación de los bancos de arena de la margen derecha.

Los resultados obtenidos fueron muy satisfactorios ya que se pasó de 1 m de profundidad cuando comenzaron las obras en 1881, a 4,6 m de profundidad mínima tras su finalización en 1887. Este muelle prolongado favoreció, asimismo, la acumulación de arena en la parte superior de la antigua playa de Portugalete en la margen izquierda (Figura 1-14) pero profundizando su parte interna, que pasó de 2 a 4 m de columna de agua.



Figura 1-14: Prolongación del muelle de Portugalete en la margen izquierda con una ligera curvatura (año 1891).

Con el objetivo de continuar la canalización de la ría en la zona media que había comenzado años atrás, se decidió construir un nuevo muelle cauce arriba, en la margen derecha (Axpe), para eliminar la curva del cauce original y los peligrosos bajos rocosos presentes en este tramo, donde los barcos varaban con frecuencia. Así, se adoptó para el nuevo cauce la anchura de 150 m, suficiente para la navegación, y se utilizó este bajo rocoso para cimentar el muelle transversal de una dársena de 14 ha de superficie que encauzara la margen derecha de la ría y que sirviera

de fondeadero a los buques que estuvieran esperando turno para cargar en las terminales de los ferrocarriles mineros (Figura 1-16). En la margen izquierda el encauzamiento lo habían realizado ya las compañías mineras, y únicamente se construyó junto a la desembocadura del Galindo una dársena de 4 ha, que también sirviera de fondeadero, dejando así el cauce de la ría más despejado. Consecuentemente, en esta zona de la margen izquierda de la ría, donde antes se extendía una playa fangosa, se instaló alrededor de 1880 uno de los principales centros de actividad industrial de la ría.



Figura 1-15: Plano del proyecto de Evaristo Churrua (finales del s. XIX), cuyo desarrollo permitió mejorar considerablemente el acceso navegable a Bilbao.



Figura 1-16: La ría en la zona de Axpe a finales del s. XIX.

En el invierno de 1877 a 1878 se emprendieron las obras de reforma de la curva presente entre las zonas media y superior (Elorrieta), por donde debían pasar los buques que subían a los muelles urbanos de Bilbao. Esta curva presentaba originalmente un radio de 180 m, varando ahí frecuentemente los barcos contra las peñas que salían al pie del monte. La solución adoptada fue la apertura de un nuevo cauce, con una curva de 510 m de radio y que presentaba, además, una anchura media de 100 m y una profundidad de 4,5 m en bajamar. Para ello, se abrió con la draga un nuevo canal que cortara en 2 partes al antiguo curso de la ría, cerrándose el cauce original con el material procedente de esta excavación y del extraído de un monte próximo (Monte Cabras).

La posibilidad de acceso hasta la Villa para los barcos estaba entonces limitada exclusivamente a las pleamares, debido a la escasa profundidad que existía en la zona superior. Alrededor de 1885, se llevaron a cabo una serie de obras de mejora en esa zona de la ría que beneficiaron al tráfico comercial de Bilbao:

1) en su parte baja (Elorrieta-Olabea), donde la ría estaba ya encauzada con bastante regularidad, sólo se necesitaba un dragado general para ahondar el cauce hasta profundidades entre 3,5-4 m con respecto a la bajamar.

2) en su parte media (Olabea-La Salve) (Figura 1-17), el cauce estaba obstruido por una gran masa de grava y cantos, conocidos como “churros”, adop-

tándose la solución de rectificar el antiguo encauzamiento de la margen derecha y construir el que faltaba en la margen izquierda, dragándose además todo el canal hasta profundidades comprendidas entre 3-3,5 m por debajo de la bajamar.

3) en la zona más superior (La Salve-Atxuri), además del dragado general del cauce hasta profundidades entre 2,5-3 m, se reformó y ensanchó una violenta y estrecha curva, construyendo muelles en ambas márgenes con una anchura suficiente (95 m) para que los grandes vapores que llegaban hasta Bilbao pudieran dar la vuelta en esa zona.

A continuación, surgió la necesidad de construir en El Abra un antepuerto que además de servir para abrigo de la embocadura de la ría, donde se dejaban sentir los fuertes temporales, constituyera un puerto mercantil y de refugio, en el que pudieran fondear los mayores buques comerciales y militares, y proporcionara además nuevos mercados a la industria y minería locales.

El Abra de Bilbao por su extensa superficie, gran profundidad y ausencia de bajos rocosos, se prestaba bien a la creación de un puerto exterior. Esta colosal obra consistió en un rompeolas principal de 1450 m de longitud, directamente expuesta al oleaje dominante y que arrancaba de la costa occidental del Abra, y en un contramuelle de 1072 m de longitud, en la costa oriental del Abra, y en dirección W, formando ambas estructuras la embocadura del puerto. El contramuelle queda casi perpendicular a las



Figura 1-17: Obras de rectificación del cauce en La Salve en 1885.

corrientes dominantes y protegido de su acción directa, generando una superficie total de puerto protegido de 300 ha. El rompeolas comenzó a construirse en 1891 y acabó de construirse en 1905, mientras que el contramuelle se finalizó en 1903 y su construcción supuso la paralización definitiva de la corriente del NW y la retención de su flujo de arena, que actualmente ya no tiene acceso a la boca de la

ría. Como consecuencia, esta obra produjo la desaparición de la gran playa de la margen derecha (Las Arenas), cuyo último reducto se encuentra adosado al muelle de Las Arenas (Muelle de Churruca).

Durante este tiempo se construyeron también las obras de defensa de la playa de Las Arenas (Paseo de Las Arenas) y las de defensa de la costa de Algorta (Figura 1-18).

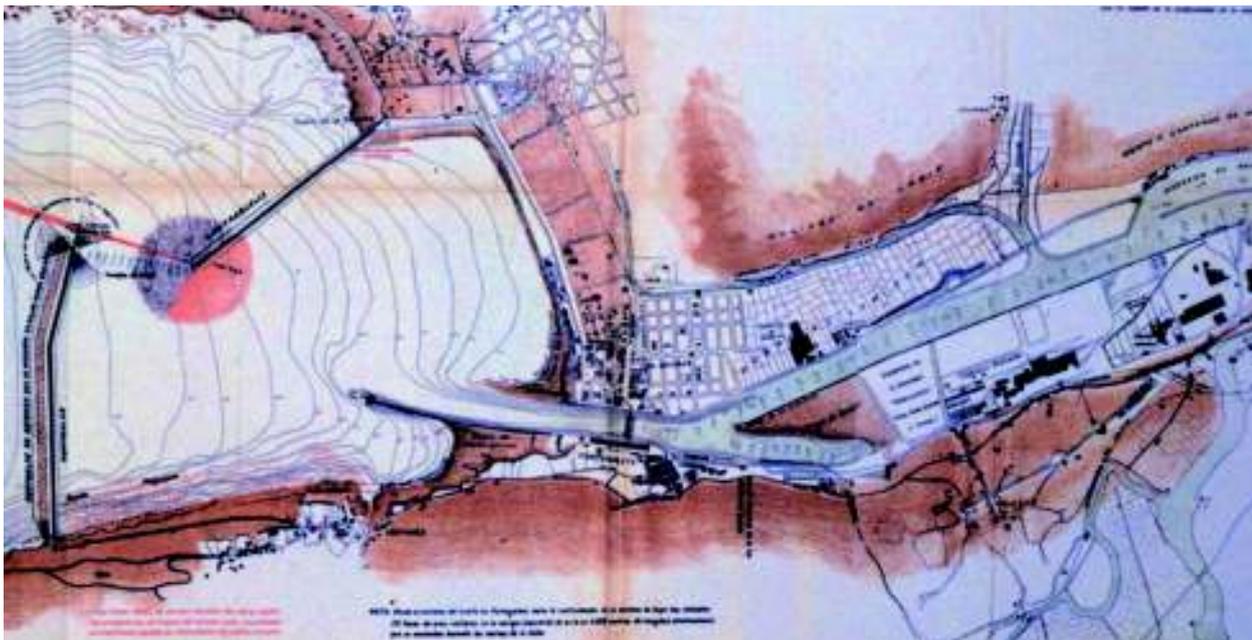


Figura 1-18: Plano de las obras ejecutadas en la desembocadura de la ría en el año 1905.

Posteriormente, para construir el muelle de atraque al abrigo del Rompeolas, se levantaron en 1907 una serie de muros que recorrían paralelamente la costa rocosa de la margen izquierda, en la bahía interior, y cuyo espacio intermedio fue rellenado de material y terraplenado con el fin de construir los accesos necesarios para el puerto exterior. De este modo, desaparecieron la antigua playa de Portugalete (Figura 1-14) y el puerto pesquero de Santurtzi situado en el espacio que hoy ocupa el Parque de esta localidad.

Otro gran proyecto ideado en los años 30, fue la desviación de la ría en su tramo superior, que pretendía corregir el cauce fluvial permitiendo así que los grandes buques de la época atracaran en los muelles presentes en la zona superior. Este proyecto denominado "Canal de Deusto", contemplaba inicialmente el cierre del cauce original de la ría, formando una dársena en el antiguo cauce y abriendo otro curso de agua, creando un trazado más recto. Problemas económicos iniciales, la Guerra Civil y sus consecuencias posteriores impidieron que el proyecto se llevara a cabo antes de 1960, entrando finalmente en servicio durante 1968, pero únicamente como dársena abierta (Figura 1-19). Sin embargo, la idea no parece haber sido abandonada completamente y el último Plan General de Ordenación Urbana de Bilbao (presentado en 1992) contempla la

prolongación aguas arriba del Canal de Deusto creando en esta zona una isla artificial.

Por último, la instalación en San Julián de Muzkiz de la Refinería de Petróleo determinó para su funcionamiento la construcción del Espigón de Punta Lucero, dedicado al atraque de grandes petroleros. Esta obra finalizó en 1977, pero su enorme desembolso económico obligó a posponer la construcción completa del también previsto Contradique de Punta Galea, que se encuentra sumergido en la margen derecha del Abra exterior.

Puerto Autónomo de Bilbao. Actualmente, está en marcha el Proyecto de Ampliación del Puerto en El Abra exterior (iniciado en 1992) que en su primera fase, finalizada en 1998, ha creado una nueva zona portuaria en la margen izquierda de El Abra, entre Zierbena y el actual dique-rompeolas de Santurtzi, ganando terreno al mar para la ubicación de nuevos muelles y superficies portuarias (150 ha). Este proyecto incluye la construcción de un dique en escollera de unos 3500 m de longitud, quebrado en 3 alineaciones, que arranca en las proximidades de Zierbena y de un contradique recto de 1400 m de longitud que parte del actual Dique de Santurtzi, creando una boca de acceso a esta nueva zona de aguas abrigadas de 700 m de anchura. Ocupando también, con una anchura



Figura 1-19: Obras del Canal de Deusto en 1960.

media de 65 m, la franja costera entre el dique de Zierbena y el arranque del actual rompeolas de Santurtzi, con el fin de unir las dos partes de las obras y crear una dársena en su interior de 4,2 millones de m² de superficie (Figura 1-20).

La construcción de esta infraestructura, que se pretende sea la de mayor envergadura dentro del sistema portuario español, supone junto con la estructura portuaria ya existente en Santurtzi, la ocupación física de aproximadamente la mitad de la superficie del Abra, y la reducción de su anchura efectiva a casi un tercio de sus dimensiones originales.

Según el estudio geofísico llevado a cabo en El Abra por el Instituto de Ciencias del Mar de Barcelona (en ITSEMAP S.A., 1990), la sedimentación reciente en esta zona está fuertemente condicionada por el impacto que supuso la construcción del dique de Punta Lucero y del espigón sumergido de Punta Galea en la década de 1970. Consecuentemente, se puede suponer que la realización de este proyecto, tendrá unas repercusiones importantes sobre los procesos sedimentarios en el sistema de El Abra. El cambio en la intensidad y el modelo de las corrientes marinas en el área, así como la refracción del oleaje producidas por la nueva estructura proyectada permite esperar cambios morfológicos y granulométricos, por ejemplo, en las playas vecinas.

La actividad minera. Hasta el año 1830, el mineral de hierro que se trabajaba en las ferrerías podía ser extraído libremente. Sin embargo, a partir de entonces la burguesía bilbaína se hace con el control de las minas a través de la propiedad de los montes, que compraron en condiciones muy ventajosas a los ayuntamientos endeudados tras las guerras de los siglos XVIII y XIX. El principal criadero de mineral, que ya fuera descrito por el historiador romano Plinio en el siglo I, se encontraba en Somorrostro donde se instalaron importantes núcleos mineros como Gallarta, La Arboleda o Triano (Figura 1-21).

Sus condiciones naturales ofrecieron grandes facilidades: sus minerales eran de una extraordinaria riqueza, podían explotarse a cielo abierto y además se hallaban relativamente próximos a la ría. En los 50 años que van desde 1876 hasta 1925, se extrajeron más de 180 millones de toneladas de mineral de hierro, de los cuales el 75% se dedicó a la exportación, fundamentalmente para abastecer a la siderurgia inglesa (García-Merino, 1987).

Las minas de hierro han sido la base sobre la que se ha asentado la prosperidad de Bilbao. El capital producido por la exportación del mineral se utilizó para financiar la instalación de las primeras factorías. Así mismo, los primeros emigrantes que vinieron a trabajar en las minas pasaron posteriormente a la industria siderúrgica. Gracias a ellas se



Figura 1-20: Fotomontaje del proyecto actual de ampliación del Puerto Exterior.



Figura 1-21: Actividad minera en la primera mitad del s. XIX en La Arboleda

construyeron los primeros ferrocarriles y el puerto exterior, cuyas obras se financiaron mediante un impuesto sobre la exportación del mineral. En relación a las minas y al carbón, que llegaba de retorno en los barcos que exportaban el mineral, surgió la industria siderúrgica y las construcciones navales y, por extensión, las grandes compañías financieras, los bancos, los seguros, la Bolsa... Curiosamente detrás de todas estas actividades aparecen siempre los mismos hombres que se interesaron inicialmente por el negocio del hierro, como los Ibarra o los Chávarri.

Con el cambio de siglo, se llegó a la conclusión de que en vez de vender el mineral en bruto sería más ventajoso económicamente transformar el mineral de hierro a orillas de la ría y vender el producto listo para su utilización. La explotación minera pasa a un segundo plano y la base del poder económico en Bilbao a partir de entonces serán las fábricas y los bancos (García-Merino, 1987).

La actividad industrial. A modo de herencia moderna de las antiguas ferrerías, se instala en 1848 la "Fábrica de Fundiciones Santa Ana" de Bolueta, el primer alto horno sobre el río Nervión, cerca de La Peña. Pero el verdadero despegue de la gran

industria siderúrgica se realiza a orillas de la ría. En 1854 se funda en Desierto sobre terrenos ganados a la ría la fábrica "Nuestra Señora del Carmen" de Barakaldo, propiedad de la familia Ibarra que contaba con un Alto Horno y un fondeadero en el estuario para su flotilla de buques. En 1882 se constituye como sociedad anónima la empresa "Altos Hornos y Fábrica de Hierro y Acero de Bilbao" propietaria de la fundición de Barakaldo, de varias minas en Retuerto y de terrenos ganados a la ría en Sestao y Barakaldo. Asimismo, en Sestao se establece la tercera gran factoría siderúrgica, la fábrica "San Francisco", propiedad de José María Martínez de las Rivas. Antes de que finalizara el siglo XIX se habían instalado otras fábricas relacionadas con la industria siderometalúrgica como "La Iberia" en Sestao, "La Vizcaya" y "Santa Águeda" en Barakaldo, propiedad de la "Sociedad de Metalurgia y Construcciones La Vizcaya". Tras un período de trabajo en competencia, estas empresas se unen en 1902 para constituir "Altos Hornos de Vizcaya S.A." (Figura 1-22). A partir de ese momento comienza en la cuenca del Nervión la era de las grandes fábricas siderúrgicas integradas, que se localizaban en las proximidades de los yacimientos de mineral de hierro (Almunia, 1975).

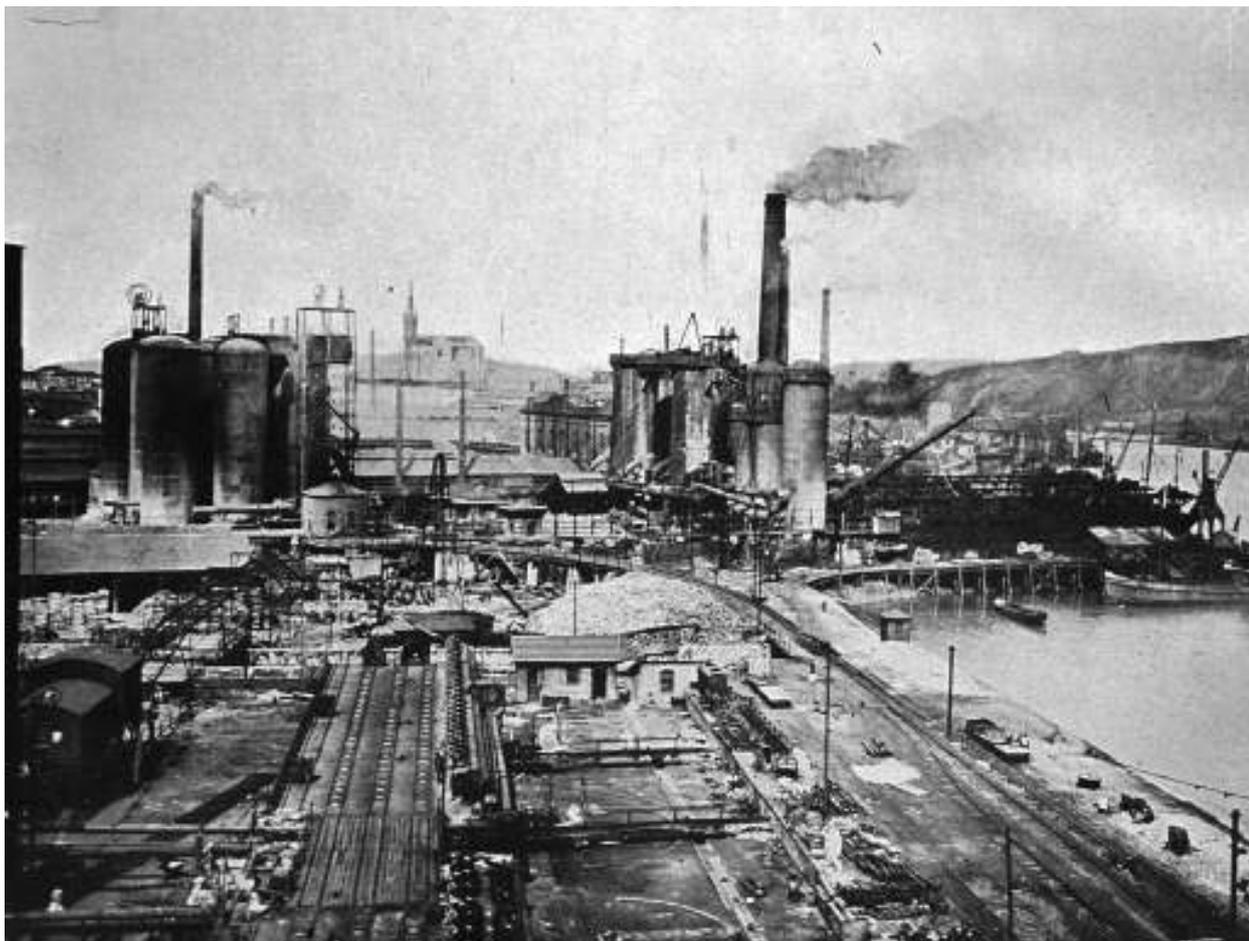


Figura 1-22: Altos Hornos de Vizcaya S.A., después de unirse las tres grandes factorías siderúrgicas en 1902.

En 1865, se inauguró el Ferrocarril Minero de Triano, desde Ortuella hasta Desierto, para transportar el mineral de hierro desde las zonas de extracción hasta las fábricas que lo consumían y a los barcos que lo exportaban. Posteriormente, se construyeron otros ferrocarriles mineros como el de Sestao a Somorrostro, el de Sestao a la Orconera o el de Portugalete a Galdames.

El siguiente paso para rentabilizar al máximo los yacimientos minerales fue vender el hierro en forma de máquinas, gracias a la metalurgia de transformación y las construcciones mecánicas pesadas.

A finales del siglo XIX, se abandona el casco de madera y la propulsión a vela y la construcción naval se hace con buques de acero y motores de vapor. Así, en 1888 se inauguran junto a las fábricas siderúrgicas los "Astilleros del Nervión" en Sestao, propiedad también de J. M. Martínez de las Rivas. Siguiendo este ejemplo, se funda en 1900 la compañía "Euskalduna" frente a Deusto y en 1916 se levanta la factoría "La Naval" de Sestao (Figura 1-23).

Desde entonces, hacen su aparición una gran cantidad de actividades industriales para hacer frente a las variadas necesidades que se iban generando, tales como industria química, farmacéutica, fábricas de pinturas, de jabón y un largo etcétera.

A partir del último cuarto del siglo XIX, el paisaje tradicional de Bilbao con bucólicas arboleadas, bellos palacios, verdes prados y arroyos limpios fue sustituido por un paisaje nuevo de humos y fábricas, de ferrocarriles, de urbanización opresiva y de movimiento incesante impuesto por la industria. Nada va a dejar de ser transformado, adaptado y desbordado por el Bilbao industrial que pasará por encima de todo.

Los montes quedaron lacerados por el movimiento de tierras de las explotaciones mineras; las marismas, las dunas y los sedimentos de la ría desaparecieron para convertirse en asiento de fábricas, viviendas, dársenas o rellenos. Las arboleadas y los arroyos fueron sustituidos por edificios,



Figura 1-23: Los Astilleros de Sestao en 1980.

vías férreas y desmontes para facilitar las comunicaciones.

Ya en 1902, se denuncia la existencia de la “niebla industrial” procedente de las chimeneas de las fábricas y de las grandes cantidades de polvo proveniente de la extracción y transporte del mineral. La contaminación de las aguas es aún más evidente. Los vertidos industriales, el lavado del mineral y los vertidos urbanos contaminan los arroyos y los acuíferos superficiales inutilizando las fuentes y convirtiendo los cursos de agua en cloacas que van a parar a la ría. El suministro de agua a las casas obligó entonces a abordar la cuestión de la traída y depuración de las aguas de Bilbao.

Apesar de los problemas técnicos que presenta la construcción sobre un sedimento insuficientemente consolidado, la industria ha colonizado las grandes superficies llanas y pantanosas de las marismas holocenas en la Ría de Bilbao, al encontrarlas más fáciles de ocupar que las fuertes pendientes del valle no afectadas por la influencia marina. Como hemos visto anteriormente, en el mismo Bilbao la zona portuaria situada en ambas orillas de la ría se ha instalado sobre una marisma, del mismo modo que lo han hecho las fábricas desde Deusto hasta Elorrieta (zona del Canal de Deusto). Tras el estrechamiento de la ría en Rontegi, todas las instalaciones de Altos Hornos de Vizcaya y los diferentes astilleros ubica-

dos en la zona han aprovechado la gran zona marismeña de la margen izquierda, mientras que en la orilla opuesta, la marisma de Lamiako fue desecada, pero no ha soportado ninguna construcción.

Por otra parte, en la zona de El Abra, concretamente en la Playa de Arrigunaga (además de en Tunelboka y Azkorri, inmediatamente fuera del sistema estuarino) aparecen sedimentos de tipo beachrock (Figura 1-24). Estos materiales arenosos subactuales se encuentran ligeramente cementados por aragonito, como consecuencia de un proceso diagénético característico de ambientes marinos someros y de áreas vadoso-marinas (García-Garmilla, 1990). La presencia en estas rocas semiconsolidadas de fragmentos de vidrio y ladrillos de construcción sugiere una edad de formación muy reciente. El origen de este proceso parece encontrarse en los vertidos de escorias de fundición altamente enriquecidas en carbonato procedentes de la industria local del hierro y que se han venido efectuando a la salida de El Abra desde comienzos de siglo. La distribución de estos vertidos industriales por las corrientes marinas, ha provocado la aparición de este fenómeno observable exclusivamente en este área litoral (Diputación Foral de Bizkaia, 1990). Recientemente estos materiales han sido cubiertos artificialmente con arena extraída de la plataforma interna frente a Bakio (Sener, 1998).



Figura 1-24: Beach-rock (playa cementada) de Arrigunaga.

La expansión urbana por la Ría de Bilbao. Hasta la primera mitad del siglo XIX, fue Bilbao quien acogió el lento crecimiento demográfico de este área. La primera zona que fue conquistada por la ciudad fue El Arenal, que comenzó a ser ocupado con la ampliación del casco urbano desde finales del siglo XV y que fue ganado definitivamente a la ría en el siglo XVII cuando se convirtió en paseo público. Tras la anexión de Abando en 1870, en la curva de meandro al otro lado de la ría, se construye el Ensanche que responde a la necesidad de crecimiento de la ciudad tradicional ante los primeros impulsos de la industrialización. Pero no se trata sólo de ampliar la ciudad en la planicie de Abando, sino de crear una ciudad nueva, que sea expresión de prestigio y poder y que surja de las necesidades y de la mentalidad de las clases dominantes que ahí se iban a establecer (García-Merino, 1987).

En la segunda mitad del siglo XIX, la sociedad de familias de la que nace la oligarquía bilbaína empieza a pensar que Bilbao ya no es solamente “El Bocho”, la villa histórica, sino que la localización de sus fábricas y minas, así como de sus segundas residencias les hace considerar toda la ría como las afueras de Bilbao. Bilbao empieza a proyectarse

sobre todo el espacio de la ría. Esta concepción de la ría como una unidad dependiente de Bilbao se vio extraordinariamente potenciada por la red de comunicaciones rápidas que se establecieron a ambos lados del cauce.

Portugalete fue el primer sitio al que acudieron las grandes familias de Bilbao a mediados del siglo XIX para tomar los saludables “baños de mar”. Esta villa tenía entonces una pequeña playa donde se reunía la buena sociedad en verano (Figura 1-25). Sin embargo, ese papel pronto pasó a la otra margen del Abra.

A pesar de que el núcleo inicial de Portugalete se creara para ofrecer auxilio a las naves que surcaban la ría y naufragaban en su desembocadura, en 1322 fue fundada como villa con jurisdicción portuaria sobre la mitad inferior de la ría y El Abra. Durante la Edad Media se produjeron numerosas luchas y conflictos entre la villa de Bilbao, situada en la cabecera de la ría, y la de Portugalete, localizada en su desembocadura, por el control del tráfico comercial en el estuario y por la expansión de sus respectivas zonas de influencia.

En 1857, Máximo Aguirre compró al Estado los arenales y fangales de Lamiako y Las Arenas que



Figura 1-25: "Baños de mar" en la pequeña playa de Portugalete (año 1892).

fueron desecados y "saneados" con pinos marítimos y plantas fijadoras siguiendo el modelo francés en Las Landas. Las marismas de Lamiako se convirtieron en tierra de labor agrícola y sobre los antiguos arenales se construyeron casas de veraneo para las grandes familias de Bilbao y el "Establecimiento de Baños de Mar Bilbaínos" para una selecta clientela. Con el objetivo de revalorizar estos extensos terrenos, sus descendientes potenciaron la construcción del ferrocarril de Bilbao a Las Arenas que fue inaugurado en 1887 y ampliado hasta Plentzia en 1893.

El fin de la segunda guerra carlista en 1876 representa un acontecimiento de primer orden en la evolución del conjunto de la ría. En ese momento se cierra un período histórico caracterizado por la actividad mercantil y la competencia entre la Villa de Bilbao y el Señorío de Bizkaia, y se abre el proceso de desarrollo industrial que transformó la ciudad, y con ella a toda la ría.

Durante el último cuarto del siglo XIX se aprueba la expansión urbana de Bilbao, se inician las exportaciones masivas de mineral de hierro, se empieza a instalar la industria siderúrgica, se prepara el acondicionamiento de la ría y se proyecta el

puerto exterior. A partir de entonces serán los municipios afectados por el desarrollo de las explotaciones mineras y la instalación de las fábricas, como Barakaldo, Sestao o Erandio, quienes sufrirán una auténtica explosión demográfica.

El resultado de todo esto es la impresionante expansión urbana del conjunto de la ría que pasa de 60000 a 1 millón de personas, convirtiendo el Bilbao histórico en el denominado "Gran Bilbao" (García-Merino, 1987).

De este modo, se produce una clara atribución social del espacio alrededor de la ría. En Bilbao la burguesía ocupa el Ensanche y el Campo de Volantín, la clase media reside en el Casco Viejo, y el proletariado se encuentra alrededor de Bilbao la Vieja, junto a las minas de hierro. La margen izquierda de la ría y Erandio (margen derecha) se convierten en el área industrial y proletaria donde radica la industria pesada y más contaminante, mientras que hacia la desembocadura, Getxo acogerá zonas de elevado prestigio social como Las Arenas y Neguri.

Plan Integral de Saneamiento de Aguas de la Comarca del Gran Bilbao. Desde el inicio del siglo XX (fecha en la que ya se mencionan las burbujas

de gas sulfídrico que emite el fondo de la ría y la activa fermentación pútrida del fondo y sus orillas, con el consiguiente riesgo sanitario) se ha ido asentando una gran urbe metropolitana con una actividad industrial muy diversificada sobre las márgenes de la ría del Nervión y los diversos ríos menores que vierten a ella, por lo que sus aguas han recibido efluentes domésticos e industriales muy variados, que han sido arrojados por la tubería directamente a este medio (Figura 1-26). Como consecuencia, las aguas de la ría se caracterizan por presentar unas bajísimas concentraciones de oxígeno disuelto, altos contenidos en nutrientes y materia orgánica, unas condiciones de relativa acidez, y además unas elevadas concentraciones de metales pesados que tienden a depositarse en los sedimentos del fondo. De hecho, aún hoy el agua y los sedimentos de la ría tienen bajísimas concentraciones de oxígeno disuelto y, en cambio, altos contenidos en materia orgánica y metales pesados, convirtiendo a la ría en la zona con mayor nivel de contaminación química de todo el Cantábrico.

La concentración en metales pesados en el agua de la ría, ha superado ampliamente los valores recomendados por la E.P.A. (Environmental Protection Agency, U.S.A.) para zonas estuarinas. La mayoría de estos metales pesados han precipitado y se han depositado en el sedimento del fondo. Según el estudio de impacto ambiental elabo-

rado por ITSEMAP S.A. (1990), el tramo de la ría más contaminado (alto contenido en metales pesados, valores mínimos de oxígeno disuelto, valores máximos de amoníaco, fenoles y cianuros) se situaba entre la desembocadura del río Asua (zona media) y la desembocadura de la ría, provocando la ausencia total de vida animal y la inhibición de las bacterias nitrificantes en el sedimento.

A lo largo de la ría, desde la cabecera hasta la desembocadura, el sedimento del fondo presenta un marcado carácter anóxico, exhibe valores del pH ácidos particularmente bajas aguas arriba y su contenido en finos (<100µm) aumenta paulatinamente conforme descendemos hacia la desembocadura. Las concentraciones de metales pesados en los sedimentos son muy superiores a las detectadas en la columna de agua, apareciendo contenidos muy altos en Pb, Cd, Zn, Cu, As y Hg con una distribución espacial compleja (Autoridad Portuaria de Bilbao, 1999-2000).

En la zona del Abra, según un estudio realizado en 1988 por el Consorcio de Aguas del Gran Bilbao, los sedimentos marinos presentaban un pH ácido, eran de carácter anaeróbico y mostraban altas concentraciones en metales pesados, concluyendo que todo El Abra estaba afectada por la contaminación proveniente de la ría. El análisis de los valores del contenido en metales pesados de los sedimentos de El Abra de Bilbao (Puerto de Santurtzi y Punta Lucero), obtenidos



Figura 1-26: Vertidos directos a la ría sin ningún tipo de tratamiento en la década de 1970.



Figura 1-27: Foto aérea (año 1957) donde se observa el giro en sentido horario de la corriente estuarina vaciante dentro del Abra.

por distintos organismos públicos locales y Greenpeace, permite concluir que los sedimentos marinos se encuentran enormemente contaminados por metales pesados, si se comparan con el Fondo Geoquímico Regional para la cuenca del Nervión-Ibaizabal establecido por Seebold *et al.* (1982). Este Fondo Geoquímico Regional corresponde al contenido en estos metales pesados que se encuentra encerrado en las rocas de la cuenca drenada por el río Nervión y sus tributarios, y puede ser asimilado a un nivel de contaminación cero. Las mayores concentraciones se registran en El Abra interior, donde se detecta un giro en sentido horario de la corriente vaciante como consecuencia del efecto producido por el Contradique de Algorta (Figura 1-27), y posteriormente en la orilla izquierda de El Abra exterior, por el efecto de abrigo que ejerce el Dique de Punta Lucero a esta misma corriente vaciante que sale por la orilla derecha, pero que parcialmente realiza un giro antihorario encauzada por el Dique sumergido de Punta Galea. La influencia de los metales pesados presentes en este medio, se hace sentir incluso a 200 m de profundidad en la plataforma marina interna, frente a la salida de la ría (Guerrero *et al.*, 1988), como consecuencia de los continuos vertidos de material dragado en la ría que el Puerto Autónomo de Bilbao ha llevado

acabo, sin ningún tipo de tratamiento previo, a unas 3 millas fuera de El Abra exterior.

Como respuesta a esta situación se pone en marcha el "Plan de Saneamiento Integral" del Consorcio de Aguas Bilbao Bizkaia, que supone la obra de infraestructura ambiental más importante del País Vasco. El objetivo de este plan es recoger las aguas residuales, tratarlas en plantas depuradoras y devolverlas al medio natural ya limpias (Bilbao Ría 2000, 2003).

El Plan de Saneamiento Integral abarca un área urbana e industrial con una población cercana al millón de habitantes. Su desarrollo se estructuró en tres fases consecutivas, y fue iniciado en 1983. La fecha de finalización del Plan se situó inicialmente en el año 2002, pero los sucesivos retrasos habidos en el desarrollo de un plan tan complejo y costoso han llevado a marcar un nuevo horizonte para alcanzar la depuración del 100% de los residuos vertidos (González Oreja, 1999). Se espera lograr este objetivo en la tercera fase de desarrollo, que abarca el periodo 2000-2005. En cualquier caso ya se han ejecutado obras de gran envergadura como el Sifón de la Universidad (inaugurado en 1997) o el Colector de Olabeaga (finalizado en 2002).

En la actualidad, la ría comienza a mostrar unas ciertas mejoras en cuanto a la naturaleza de sus sedimentos superficiales, pero todavía estamos muy lejos de alcanzar las condiciones de naturalidad ambiental que tuvo hasta hace 150 años (Capítulos 2 y 5).

1.4. Objetivos de esta investigación

Teniendo en cuenta la situación ambiental anteriormente expuesta, los objetivos generales planteados para este trabajo son:

1 - La reconstrucción paleoambiental de la Ría de Bilbao, a través del estudio de las asociaciones de foraminíferos contenidas en el registro sedimentario holoceno depositado desde su formación durante el ascenso postglaciar del nivel del mar hasta el siglo XIX.

2 - La comparación de estos datos con otros provenientes de diferentes áreas del Golfo de Bizkaia para construir un esquema general de los cambios en el nivel del mar y de la evolución costera en esta zona durante los últimos 8500 años.

3 - La identificación de las principales especies y asociaciones de foraminíferos en el estuario pre-industrial de Bilbao, con el fin de establecer la línea base local con la que comparar las asociaciones actuales y futuras.

4 - La ilustración del proceso de reemplazamiento biológico de la Ría de Bilbao desde los materiales pre-industriales hasta los sedimentos actuales, a través del estudio de las asociaciones de foraminíferos contenidas en los testigos sedimentarios recogidos de las llanuras intermareales altamente contaminadas.

5 - La reconstrucción de la historia de la influencia antrópica reciente sobre la Ría de Bilbao, a través del estudio de pequeños testigos recogidos en las llanuras intermareales altamente contaminadas y la asignación de una cronología a los aportes contaminantes y a los cambios ambientales experimentados por este estuario.

6 - La interpretación del significado ambiental de la distribución y abundancia de los foraminíferos bentónicos obtenidos en muestras superficiales.

7 - La creación de una red de muestreo que permita evaluar en un futuro los avances producidos en el proceso de regeneración ambiental de este estuario.

8 - La evaluación de la recuperación biológica, desde el punto de vista de las asociaciones de foraminíferos, como consecuencia de la mejora en las condiciones ambientales de la Ría de Bilbao, tras la implantación del Plan Integral de Saneamiento y la reducción de vertido.



2. Procesos naturales (8500 años BP- siglo XIX)



La Ria de Bilbao originalmente debió ser un paisaje idílico, como muestra la imagen.

2.1. Introducción

Como hemos visto en el Capítulo 1, la zona oriental de la costa cantábrica está caracterizada por rocas sedimentarias Mesozoicas-Cenozoicas, que forman un perfil costero de altos acantilados interrumpido por pequeños y estrechos estuarios separados del mar abierto por barras de arena, playas y depósitos dunares (Figura 2-1). La morfología y extensión de los diferentes medios sedimentarios estuarinos es constantemente alterada por la erosión y el depósito de sedimentos, siendo éstos muy sensibles a los pequeños cambios del nivel del mar. El episodio transgresivo holoceno provocó el depósito de grandes volúmenes de sedimentos estuarinos bien preservados, que pueden ser estudiados para entender las variaciones ambientales y los cambios del nivel del mar que se han producido durante este interglaciar.

La Ría de Bilbao fue originalmente la zona estuarina más extensa de la costa Cantábrica (Hazera, 1968). El canal actual de la ría tiene una longitud de 15 km y está formado por el tramo mareal del río Nervión y sus cuatro afluentes (Kadagua, Asua, Galindo y Gobelás), que descargan en el cauce principal (Figura 2-2). Las mareas son semidiurnas,

con rangos que van desde 4,6 m (mareas vivas) a 1,2 m (mareas muertas) (Capítulo 1).

Como hemos visto anteriormente, durante los dos últimos siglos las características naturales de la Ría de Bilbao han sido dramáticamente modificadas por el desarrollo urbano, industrial y portuario de esta zona (Figura 2-3). La explotación de las abundantes menas de hierro locales condujo a su temprano desarrollo industrial a mediados del siglo XIX. El estuario original fue rápidamente reducido mediante la ocupación de los terrenos, dejando únicamente un canal mareal. Este canal fue aislado de las áreas intermareales originales mediante la construcción de diques, con el fin de conseguir un curso navegable desde la ciudad hasta el mar abierto (García-Merino, 1987). Hoy en día la Ría de Bilbao es un sistema totalmente artificial, que presenta un mínimo parecido a lo que fuera originalmente. Rivas (1991) ha calculado que la superficie estuarina total ocupada por la actividad humana alcanza aproximadamente las 1000 ha. Además, durante los últimos 150 años el estuario actual ha recibido vertidos de muy diversas fuentes (lavado mineral, vertidos industriales y efluentes urbanos) que han degradado significativamente la calidad ambiental de la ría (Cearreta *et al.*, 2002a).



Figura 2-1: Perfil típico de la costa Cantábrica: desde la Bahía de Plentzia-Gorliz hasta el Abra (al fondo).

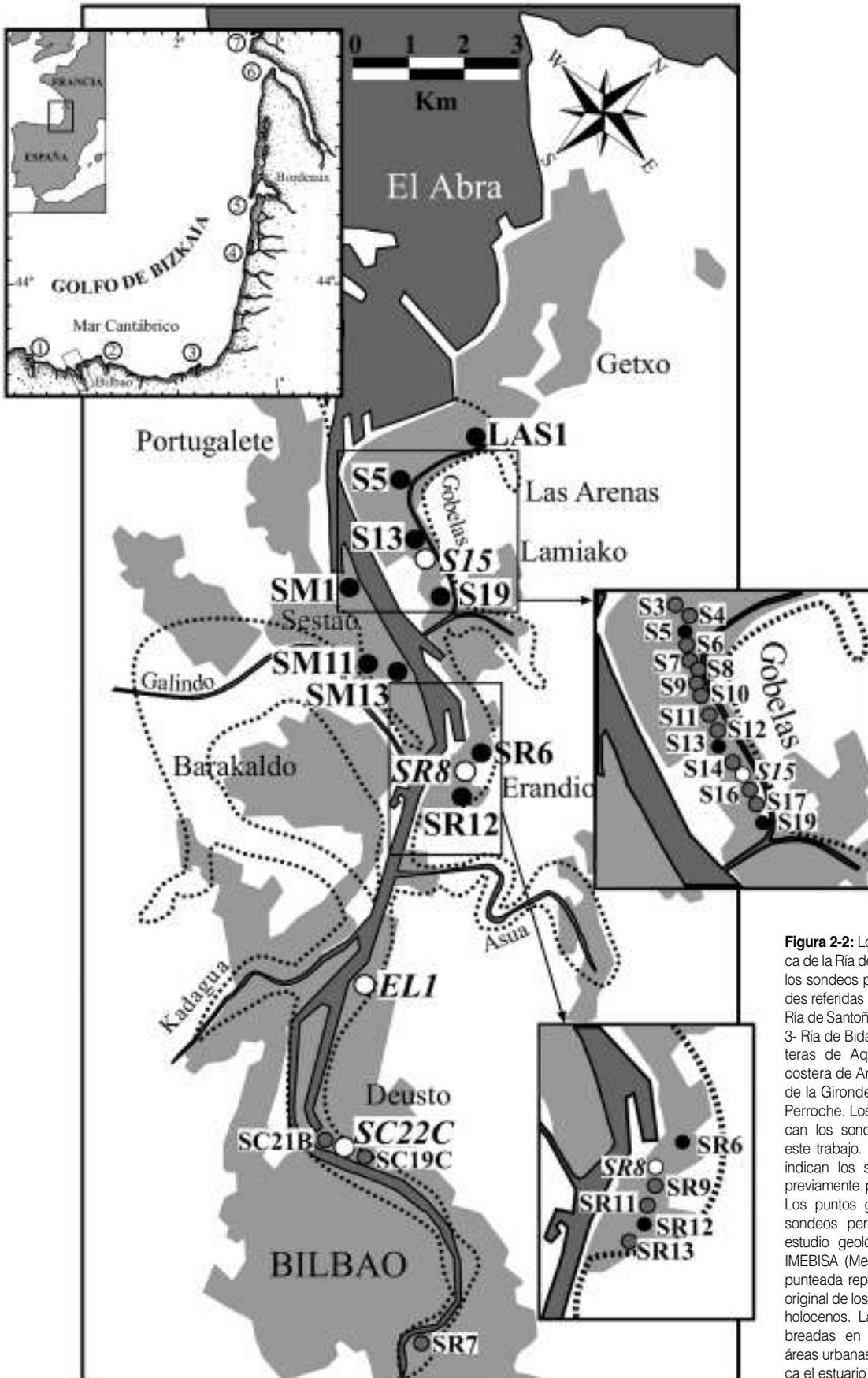


Figura 2-2: Localización geográfica de la Ría de Bilbao, posición de los sondeos profundos y localidades referidas en el texto. Clave: 1- Ría de Santoña; 2- Ría de Gernika; 3- Ría de Bidasoa; 4- Dunas costeras de Aquitania; 5- Laguna costera de Arcachon; 6- Estuario de la Gironde; 7- Marisma de La Perroche. Los puntos negros indican los sondeos estudiados en este trabajo. Los puntos blancos indican los sondeos estudiados previamente por Cearreta (1998). Los puntos grises indican otros sondeos perforados durante el estudio geológico realizado por IMEBISA (Metro Bilbao). La línea punteada representa la extensión original de los dominios estuarinos holocenos. Las superficies sombreadas en gris claro son las áreas urbanas. El gris oscuro indica el estuario actual y el mar.

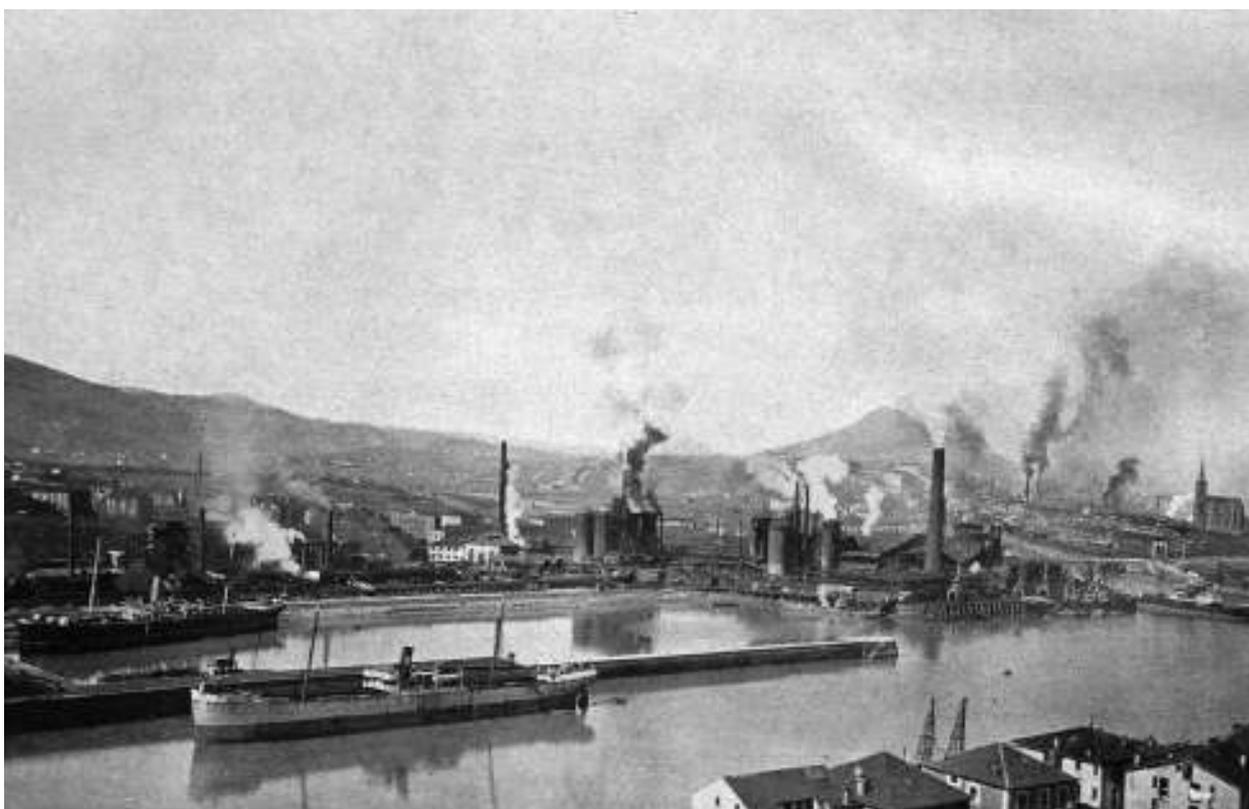


Figura 2-3: La industria situada en la margen izquierda (Barakaldo) a principios del s. XX.

El objetivo general de este capítulo es la reconstrucción paleoambiental de la Ría de Bilbao desde su formación tras el último cambio climático y durante el consiguiente ascenso del nivel del mar postglaciar. Con este fin, se ha analizado el contenido micropaleontológico (foraminíferos bentónicos) de nueve sondeos de rotación, obtenidos en las áreas ocupadas del eje principal del estuario en sus zonas media e inferior (Figura 2-2) y de dos sondeos situados en un antiguo meandro abandonado que el río Nervión formó alrededor de Barakaldo (Figura 2-17). La integración de estos resultados con los obtenidos en los sondeos previamente estudiados (Cearreta, 1998), nos ha permitido reconstruir la evolución ambiental de este estuario durante el Holoceno. Este desarrollo ambiental se ha organizado en diferentes cortejos sedimentarios siguiendo una interpretación de secuencias estratigráficas (Allen y Posamentier, 1993). Las dataciones de radiocarbono y análisis polínicos preliminares, han permitido localizar en el tiempo los diferentes paleoambientes y episodios identificados en los sondeos. La comparación de estos datos con otros procedentes de diferentes áreas del Golfo de Bizkaia permite reconstruir un esquema general de los cambios del nivel marino y

de la consecuente evolución costera de esta zona durante, al menos, los últimos 8500 años. Además, la identificación de las principales especies y asociaciones de foraminíferos en el estuario pre-industrial de Bilbao, representa la línea de base local para evaluar la efectividad de la regeneración ambiental del estuario moderno que están desarrollando actualmente las autoridades locales (Capítulos 4 y 5).

2.2.Eje principal del estuario

2.2.a) Materiales y Métodos

Las secuencias sedimentarias analizadas en este trabajo, se obtuvieron durante el periodo 1988-1990 como parte del estudio geológico para la construcción del Ferrocarril Metropolitano de Bilbao (sondeos SR12, SR6, S19, S13 y S5). Los sondeos restantes (SM13, SM11, SM1 y LAS1) se perforaron en 1998 como parte de diversos trabajos de ingeniería civil, que fueron llevados a cabo por las autoridades locales.

Se ha mantenido aquí la denominación original de los sondeos. Las profundidades están referidas siempre al nivel local del mar (nlm, que corresponde a la bajamar equinoccial en el

Puerto de Bilbao, fechada el 27 de septiembre de 1878; Leorri y Cearreta, 2004). Los sondeos fueron perforados en las áreas ocupadas del estuario original, utilizando una perforadora de rotación que produjo un sondeo de aproximadamente 10 cm de diámetro. En todos los casos, los sondeos terminaron en el sustrato cretácico. Las muestras para el análisis micropaleontológico se tomaron a intervalos aproximados de 50 cm.

Los sondeos SR6 y SR12 fueron perforados en la orilla derecha de la zona media del estuario (Erando, Figura 2-2).

Sondeo SR12:

Localización: 502215/4794590

Longitud: 27,30 m.

Cota: +5,43 m sobre el nlm.

Sustrato: alcanzado a -21,37 m.

Sondeo SR6:

Localización: 502143/4795036

Longitud: 26,50 m.

Cota: +5,42 m sobre el nlm.

Sustrato: alcanzado a -18,57 m.

Estos sondeos están compuestos por grava, fango, arena y arena fangosa con restos de plantas y bioclastos en los intervalos fangosos y arenosos. Se han analizado micropaleontológicamente 25 y 33 muestras respectivamente.

Los sondeos SM13, SM11 y SM1 se perforaron en la orilla izquierda de la zona inferior del estuario (Sestao, Figura 2-2).

Sondeo SM13:

Localización: 500869/4795632

Longitud: 41,50 m.

Cota: +6,77 m sobre el nlm.

Sustrato: alcanzado a -31,97 m.

Sondeo SM11:

Localización: 500626/4795532

Longitud: 17,30 m.

Cota: +7,19 m sobre el nlm.

Sustrato: alcanzado a -6,47 m.

Sondeo SM1:

Localización: 499714/4796063

Longitud: 23,00 m.

Cota: +7,19 m sobre el nlm.

Sustrato: alcanzado a -12,85 m.

Estos sondeos están compuestos por grava, fango, arena y fango arenoso con restos de plantas y bioclastos en los intervalos fangosos y arenosos. Se han analizado 66, 20 y 35 muestras respectivamente.

Los sondeos S19 y S13 fueron perforados en la orilla derecha de la zona inferior del estuario (Lamiako, Figura 2-2).

Sondeo S19:

Localización: 500451/4796518

Longitud: 17,50 m.

Cota: +6,02 m sobre el nlm.

Sustrato: alcanzado a -5,97 m.

Sondeo S13:

Localización: 499744/4796852

Longitud: 18,50 m.

Cota: +5,23 m sobre el nlm.

Sustrato: alcanzado a -9,77 m.

Estos sondeos están compuestos por grava, fango, arena y arena fangosa con restos de plantas y bioclastos en los intervalos fangosos y arenosos. Se han analizado 21 y 20 muestras respectivamente.

Por último, los sondeos S5 y LAS1 fueron perforados en el frente marino, en la zona costera original de la bahía del Abra (Las Arenas, Figura 2-2).

Sondeo S5:

Localización: 499259/4797273

Longitud: 34,00 m.

Cota: +5,83 m sobre el nlm.

Sustrato: alcanzado a -20,57 m.

Sondeo LAS1:

Localización: 499585/4797273

Longitud: 27,40 m.

Cota: +10,73 m sobre el nlm.

Sustrato: alcanzado a -12,77 m.

Estos sondeos están compuestos por arena y arena fangosa con restos de plantas y bioclastos. Se han analizado 52 y 46 muestras respectivamente.

Se tomaron aproximadamente 300 g por muestra para su posterior tratamiento en el laboratorio, siguiendo las técnicas descritas en el apartado 1.1.c. Todas las muestras fueron divididas en sucesivas fracciones iguales entre sí y se recogieron todos los especímenes presentes en una de estas fracciones, que posteriormente fueron ordenados en celdillas numeradas y clasificados. En general, se extrajeron aproximadamente 300 individuos en cada muestra. En conjunto, se han estudiado 318 muestras y más de 88900 foraminíferos bentónicos.

Las especies se han dividido en indígenas (que viven y se reproducen dentro del área de depósito) y exóticas (transportadas desde otro ambiente, como la plataforma marina, hasta el área de depó-

sito) (Capítulo 1). Esta división está basada en la distribución actual de las asociaciones de foraminíferos en áreas estuarinas cantábricas próximas a la ría y estudiadas por Cearreta (1988).

Desafortunadamente, los sedimentos superficiales la Ría de Bilbao sólo contienen foraminíferos transportados que no pueden ser utilizados como asociaciones análogas modernas con las que realizar la comparación, debido a que la microfauna indígena ha sido eliminada por los vertidos de aguas fecales y efluentes industriales (Cearreta *et al.*, 2000; Capítulos 3 y 4). Todas las especies de foraminíferos identificadas en las muestras aparecen en el Apéndice 2-A, y las principales especies indígenas y exóticas se presentan en la Lámina 2-1. Las fotografías de microscopio electrónico fueron realizadas con un Hitachi S4100 equipado con captura de imagen digital.

Las dataciones por radiocarbono de 20 muestras de conchas y una de madera se han realizado en Beta Analytic Inc. (USA). Trece de estas muestras contenían suficiente material para realizar directamente el análisis radiométrico y su contenido en C-14 fue cuantificado midiendo la emisión de radiación que se produce durante el proceso de desintegración atómica. De estas muestras, 4 contenían menos de un gramo de carbono final y fueron analizadas con un cálculo extendido para mejorar su precisión. Las otras 8 muestras eran demasiado pequeñas y precisaron del cálculo atómico directo usando un AMS (*Accelerator Mass Spectrometry*). Todas las dataciones de radiocarbono se han calibrado al calendario civil BP (cal BP) basado en Stuiver *et al.* (1998). Las dataciones usadas en las figuras y la discusión representan la intersección de la edad de radiocarbono con la curva calibrada. Las dataciones obtenidas de material conchífero también han sido corregidas para el efecto reservorio del agua marina (edad aparente del agua superficial), que ha sido estimado en aproximadamente 400 años para el Golfo de Bizkaia (Stuiver y Brazuinas, 1993; Clavé *et al.*, 2001; Leorri y Cearreta, 2004). Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 2-1.

2.2.b) Resultados

En las Tablas 2-2 y 2-3 se presentan resumidos los principales datos microfaunísticos y sedimentológicos respectivamente.

Sondeo SR12. En la secuencia sedimentaria del sondeo SR12 pueden distinguirse cuatro

zonas en base a su contenido en microfósiles (Asociaciones de Foraminíferos: AF) (Figura 2-4, Figura 2-14A).

AF 4: presente en la base, está compuesta por 15,5 m de gravas redondeadas, arena y arcilla amarilla con escasos caparazones de foraminíferos (media 5 individuos/100 g, rango 1-18).

AF 3: compuesta por 0,8 m de arena fangosa con restos de plantas. El contenido en foraminíferos está dominado por *C. oceanensis* (media 46%), *A. tepida* (media 24%) y *H. germanica* (media 23%). *Cibicides lobatulus* (media 2%) aparece como especie secundaria. La asociación contiene un número moderado de especies (media 13), una baja abundancia de caparazones de foraminíferos (media 128 individuos/100 g) y un porcentaje extremadamente bajo de foraminíferos exóticos (media 4%). El índice α para esta asociación es 2,5 (Figura 2-13).

AF 2: está formada por 5 m de arena fangosa bioclástica y algunos restos de plantas. La asociación de foraminíferos dominante está constituida por *C. lobatulus* (media 42%, rango 32-51%), *H. germanica* (media 19%, rango 4-44%) y *A. tepida* (media 17%, rango 11-23%). *Rosalina anomala* (media 3%, rango 1-4%) aparece como especie secundaria. Esta zona muestra un elevado número de especies (media 24, rango 21-29) e individuos exóticos (media 55%, rango 27-77%). El número de caparazones es, así mismo, elevado (media 1145 individuos/100 g, rango 113-4532). A -4,5 m y a -3,5 m de profundidad se han datado sendas muestras de conchas obteniéndose edades de radiocarbono de 4860 y 4815 años cal BP respectivamente (Tabla 2-1). El índice α para esta asociación es <6 (Figura 2-13).

AF 1: está representada por 1,2 m de arena fangosa con bioclastos. La asociación de foraminíferos está dominada por *H. germanica* (media 37%, rango 34-40%), *C. lobatulus* (media 17%, rango 13-21%), *A. beccarii* (media 13%, rango 11-13%), junto con *C. williamsoni* (media 9%, rango 8-11%) como especie secundaria. Tanto la abundancia de especies (media 27, rango 24-29), como de caparazones es muy elevada (media 3075 individuos/100 g, rango 1986-4882), mientras que el contenido en foraminíferos exóticos es bajo (media 34%, rango 31-40%). El índice α para esta asociación es <7 (Figura 2-13).

En total se han encontrado 8 especies indígenas y 49 especies exóticas en este sondeo.

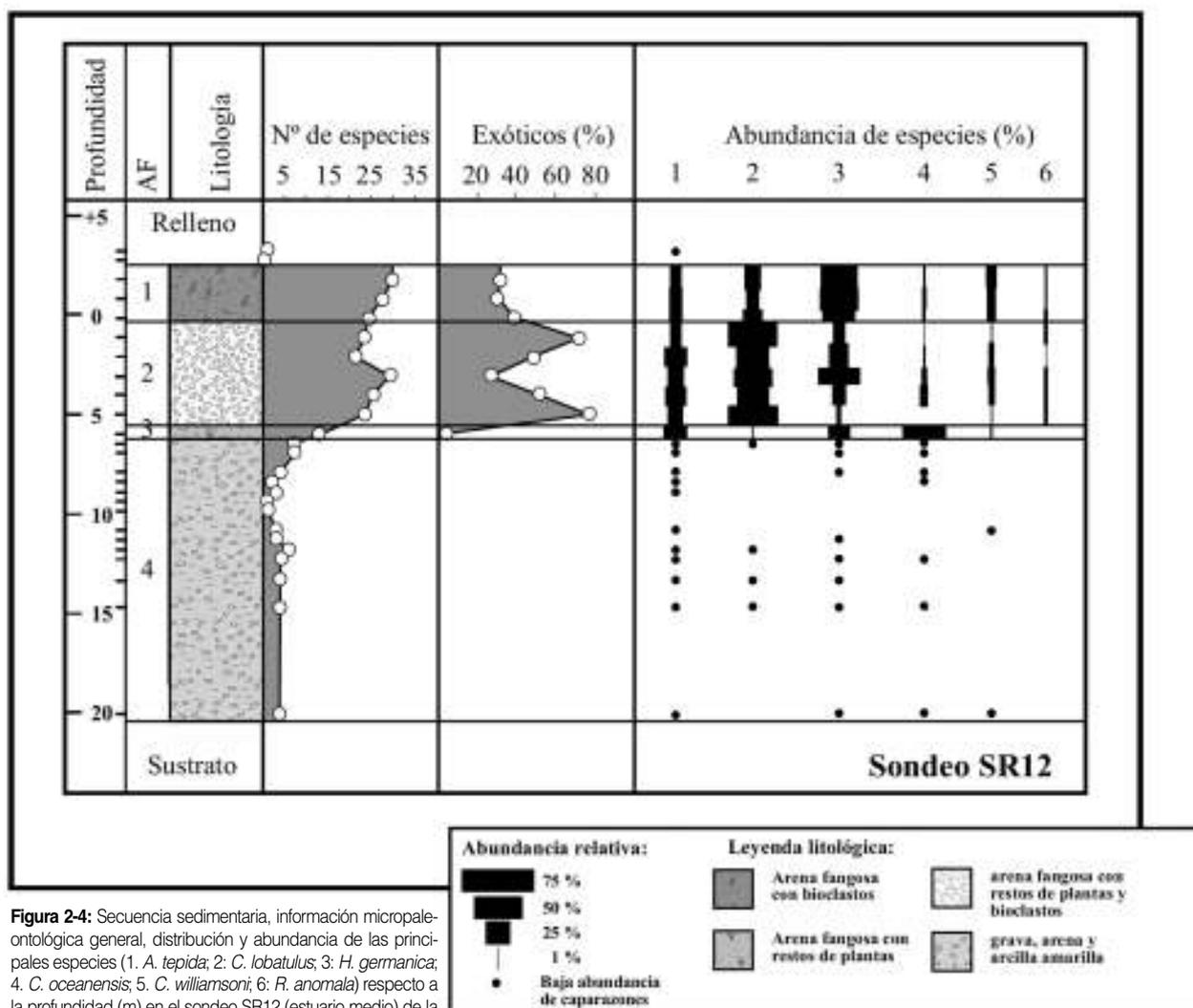


Figura 2-4: Secuencia sedimentaria, información micropaleontológica general, distribución y abundancia de las principales especies (1. *A. tepida*; 2. *C. lobatulus*; 3. *H. germanica*; 4. *C. oceanensis*; 5. *C. williamsoni*; 6. *R. anomala*) respecto a la profundidad (m) en el sondeo SR12 (estuario medio) de la Ría de Bilbao. Las muestras tomadas y las Asociaciones de Foraminíferos aparecen también señaladas.

Sondeo SR6. Basado en su contenido de foraminíferos, este sondeo puede dividirse en cuatro zonas diferentes (Figura 2-5, Figura 2-14A). En la base, la Asociación de Foraminíferos (AF) 4 está compuesta por 2,9 m de gravas redondeadas, arena y arcilla amarilla con escasos caparazones de foraminíferos (media 11, rango 1-18).

AF 3: formada por 12,1 m de fango arenoso con unos pocos restos de plantas y bioclastos. La asociación está dominada por *H. germanica* (media 32%, rango 16- 52%), *A. tepida* (media 31%, rango 14-49%) y *C. oceanensis* (media 16%, rango 1-40%). Las especies secundarias son *B. pseudoplicata* (media 3%, rango 0-6%), *Rosalina irregularis* (media 3%, rango 0-14%) y *C. lobatulus* (media 2%, rango 0- 8%). Contiene una abundancia moderada de especies (media 16, rango 8-22), un número muy elevado de caparazones (media 2990 indivi-

duos/100 g, rango 89- 8631) y un porcentaje muy bajo de foraminíferos exóticos (media 13%, rango 1- 36%). El índice α para esta asociación es >3 (Figura 2-13). A -8,0 m de profundidad se ha datado una muestra de madera, obteniendo una edad de 8390 años cal BP (Tabla 2-1).

AF 2: está compuesta por 5,8 m de arena con bioclastos y algunos restos de plantas. La asociación de foraminíferos dominante está formada por *C. lobatulus* (media 39%, rango 27-51%), *A. tepida* (media 17%, rango 12-30%) y *H. germanica* (media 15%, rango 11-17%). Las especies *R. anomala* (media 6%, rango 5-8%) y *R. irregularis* (media 5%, rango 1-14%) aparecen como especies secundarias. Esta asociación contiene una abundancia elevada de especies (media 23, rango 21-25) y de caparazones (media 2146 individuos/100 g, rango 955-6333). El porcentaje de indi-

viduos exóticos es muy elevado (media 62%, rango 50-74%). El índice α es de 5,5. A -3,0 m de profundidad una muestra de concha ha aportado una edad de radiocarbono de 1220 años cal BP (Tabla 2-1).

AF 1: está representada por 1,2 m de arena fangosa con bioclastos. La asociación de foraminíferos está dominada por *H. germanica* (media 32%, rango 31-34%), *C. williamsoni* (media 17%, rango 12-23%), *C. lobatulus* (media 17%, rango 17-18%) y *A. tepida* (media 15%, rango 14-16%). La especie *B. britannica* (media 4%, rango 1-6%) aparece como un componente secundario. El número de especies es alto (media 25, rango 23-26), al igual que el número de caparazones (media 1962 individuos/100 g, rango 1202-2721), mientras que el contenido en foraminíferos exóticos es bajo (media 29%, rango 24-35%). El índice α para esta asociación es >3 (Figura 2-13).

En total se han encontrado 9 especies indígenas y 55 especies exóticas en este sondeo.

Sondeo SM13. En función de su contenido de foraminíferos, este sondeo puede dividirse en 3 Asociaciones de Foraminíferos diferentes (Figura 2-6, Figura 2-14B).

AF 3: dispuesta en la parte inferior del sondeo, está compuesta por 26,8 m de arena marrón con restos de plantas y bioclastos. El primer metro presenta además gravas redondeadas. La asociación está dominada por *R. irregularis* (media 20%, rango 0-47%), *A. tepida* (media 20%, rango 7-39%), *C. lobatulus* (media 15%, rango 9-55%) y *H. germanica* (media 15%, rango 2-27%). Las especies secundarias son *C. oceanensis* (media 5%, rango 0,5-11%), *C. williamsoni* (media 2%, rango 0-5%) y *Miliolinella subrotunda* (media 2%, rango 0-7%). En los 6 m

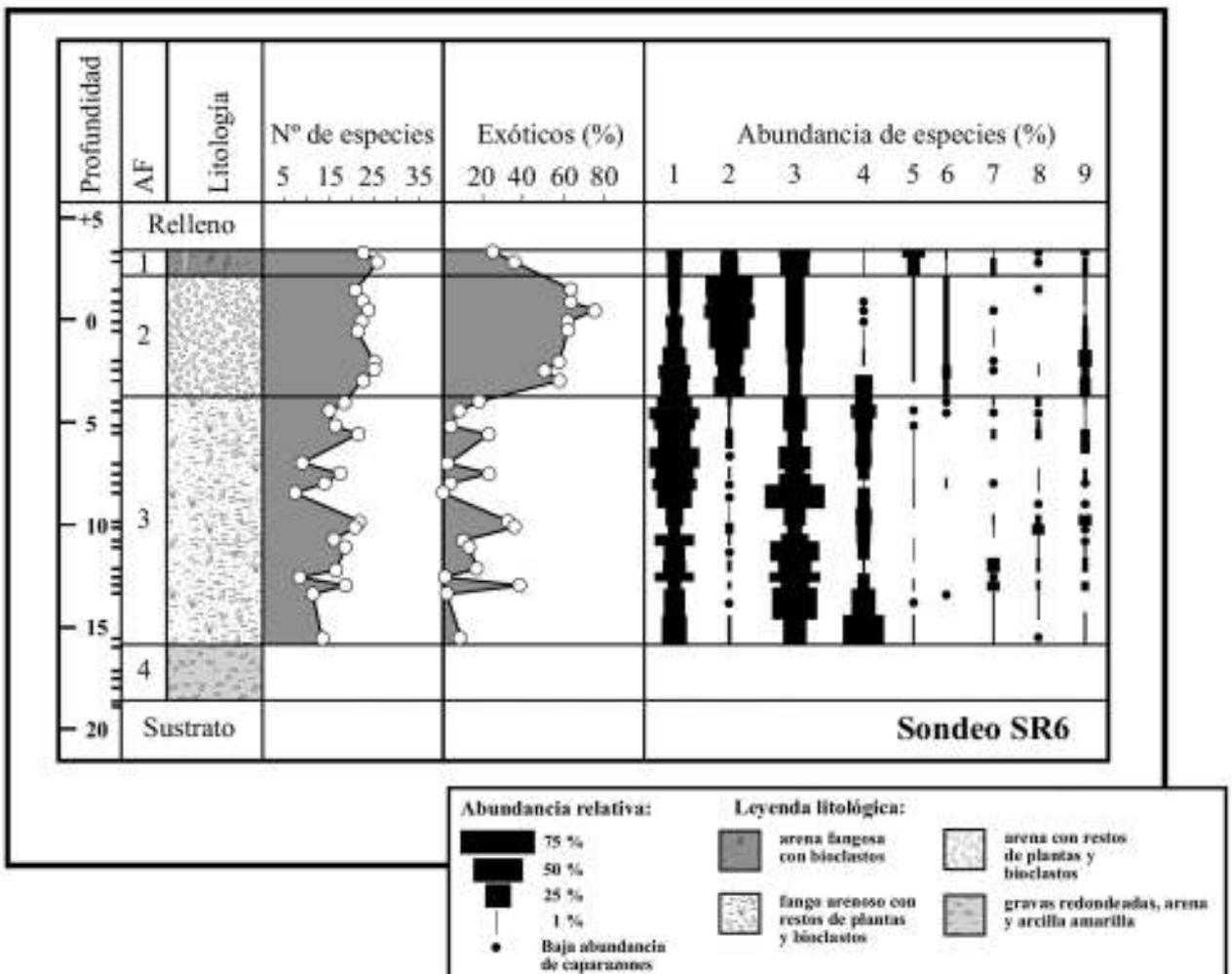


Figura 2-5: Secuencia sedimentaria, información micropaleontológica general, distribución y abundancia de las principales especies (1: *A. tepida*; 2: *C. lobatulus*; 3: *H. germanica*; 4: *C. oceanensis*; 5: *C. williamsoni*; 6: *R. anomala*; 7: *B. britannica*; 8: *B. pseudoplicata*; 9: *R. irregularis*) respecto a la profundidad (m) en el sondeo SR6 (estuario medio) de la Ría de Bilbao. Las muestras tomadas y las Asociaciones de Foraminíferos aparecen también señaladas.

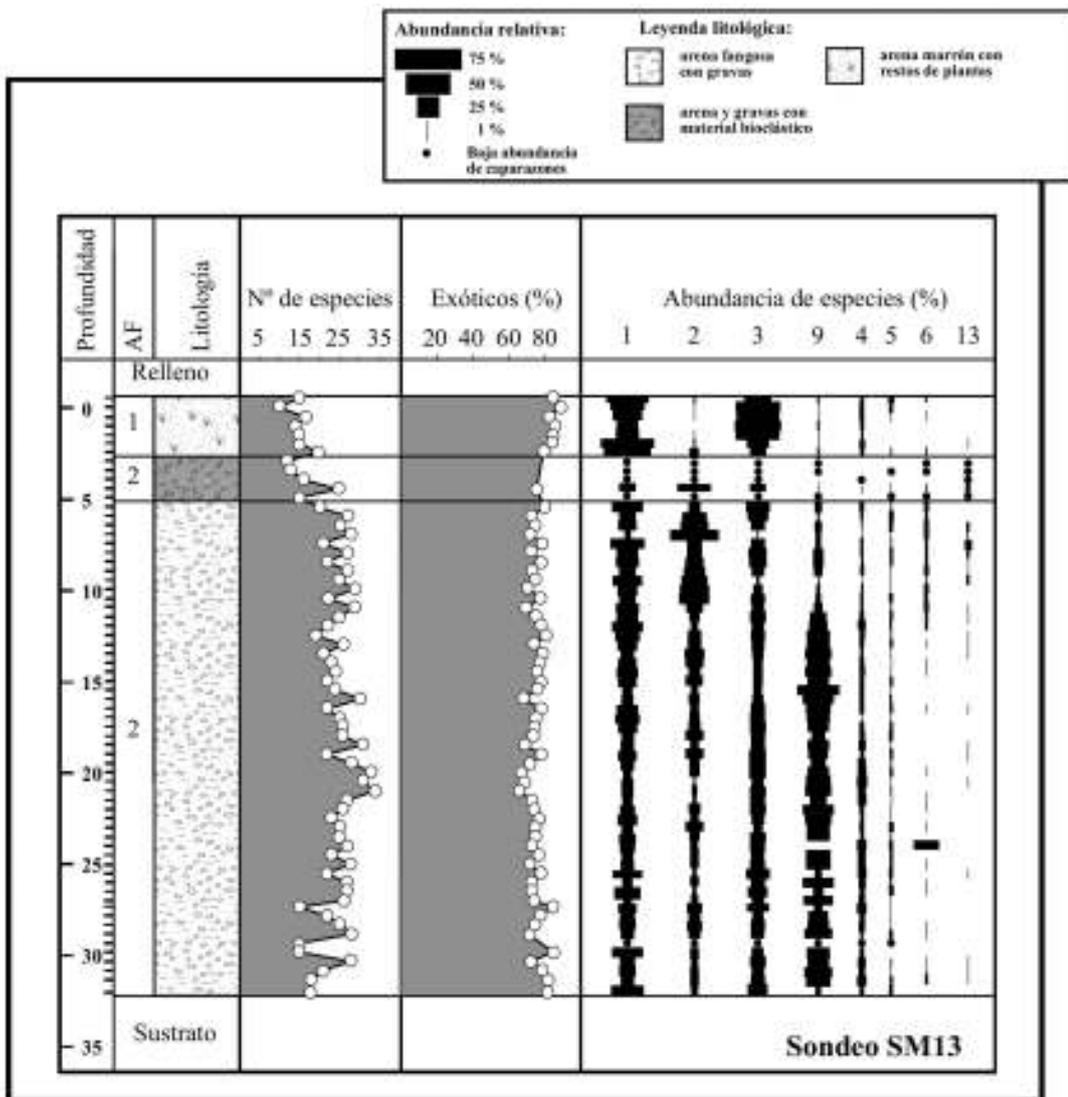
superiores de esta AF 3 las especies *R. anomala* (media 4%, rango 1-5%) y *Gaudryna rudis* (media 2%, rango 0-7%) también aparecen como secundarias. La abundancia de especies (media 26, rango 15-34) y de caparazones es muy elevada (media 4064 individuos/100 g, rango 24-50029). Los componentes exóticos presentan un porcentaje elevado (media 53%, rango 19-89%). El índice α para esta asociación es 6 (Figura 2-13). A -25,4 m y a -7,9 m de profundidad se han datado dos muestras de conchas, obteniendo unas edades de 8520 y 1685 años cal BP respectivamente (Tabla 2-1).

AF 2: está compuesta por 2,5 m de arena y gravas con material bioclástico y una presencia escasa de foraminíferos (media 44 individuos/100 g, rango 9-117), con un moderado número de especies (media 16, rango 12-25).

AF 1: está representada por 3,2 m de arena fangosa con gravas. La asociación de foraminíferos está dominada por *A. tepida* (media 40%, rango 23-61%) y *H. germanica* (media 39%, rango 17-52%). Las especies *C. oceanensis* (media 4%, rango 2-5%) y *C. lobatulus* (media 2%, rango 0-10%) aparecen como componentes secundarios. La abundancia de especies es moderada (media 15, rango 10-20), el número de caparazones es alto (media 1662 individuos/100 g, rango 106-4380) y la abundancia de foraminíferos exóticos es muy baja (media 16%, rango 4-23%). El índice α para esta asociación es >3 (Figura 2-13). A -2,4 m de profundidad una muestra de concha aportado una edad por radiocarbono de 1145 años cal BP (Tabla 2-1).

En total se han encontrado 10 especies indígenas y 71 especies exóticas en este sondeo.

Figura 2-6: Secuencia sedimentaria, información micropaleontológica general, distribución y abundancia de las principales especies (1: *A. tepida*; 2: *C. lobatulus*; 3: *H. germanica*; 4: *C. oceanensis*; 5: *C. williamsoni*; 6: *R. anomala*; 9: *R. irregularis*; 13: *G. rudis*) respecto a la profundidad (m) en el sondeo SM13 (estuario inferior) de la Ría de Bilbao. Las muestras tomadas y las Asociaciones de Foraminíferos aparecen también señaladas.



Sondeo SM11. Según su contenido en foraminíferos, este sondeo puede dividirse en tres zonas diferentes (Figura 2-7, Figura 2-14B). En la base, la AF 3 está compuesta por 1,5 m de gravas redondeadas, arenosas y fangosas, seguidas hacia arriba por 4 m de arena fangosa con algunos restos de plantas y bioclastos. La asociación de foraminíferos está compuesta por *C. lobatulus* (media 42%, rango 3- 52%), *A. tepida* (media 18%, rango 10-56%) y *H. germanica* (media 17%, rango 12-24%) como especies dominantes, y *M. secans* (media 5%, rango 0-10%), *R. anomala* (media 3%, rango 0-6%) y *C. williamsoni* (media 3%, rango 0-4%) como especies secundarias. Tanto la abundancia de especies (media 20, rango 10-27), como el número de caparazones es moderado (media 453 individuos/100 g, rango 3-1823) mientras que el número de foraminíferos exóticos es elevado (media 58%, rango 7-69). El índice α para esta asociación es >5 (Figura 2-13).

AF 2: está compuesta por 0,3 m de gravas arenosas ligeramente cementadas que presentan un escaso número de caparazones de foraminíferos (media 5 individuos/100 g).

AF 1: está representada por 2,6 m de arena fangosa con restos de plantas. La asociación de foraminíferos está dominada por *A. tepida* (media 41%, rango 32- 51%) y *H. germanica* (media 39%, rango 26-52%). Las especies *C. williamsoni* (media 4%, rango 1-6%), *C. lobatulus* (media 4%, rango 0-12%) y *C. oceanensis* (media 2%, rango 1-4%) aparecen como componentes secundarios. El número de especies es moderado (media 18, rango 15-20), el número de caparazones es elevado (media 1336 individuos/100 g, rango 59-4720) y el contenido en foraminíferos exóticos es muy bajo (media 11%, rango 5-25%). El índice α para esta asociación es <4 (Figura 2-13).

En total se han encontrado 11 especies indígenas y 54 especies exóticas en este sondeo.

Sondeo SM1. Dentro de la secuencia micropaleontológica de este sondeo pueden diferenciarse 3 zonas (Figura 2-8, Figura 2-14B).

AF 3: presente en la base del sondeo, se compone de 6,5 m de arena con gravas y bioclastos, seguida hacia arriba por 4 m de arenas fangosas con bioclastos. La asociación está dominada por *C. lobatu-*

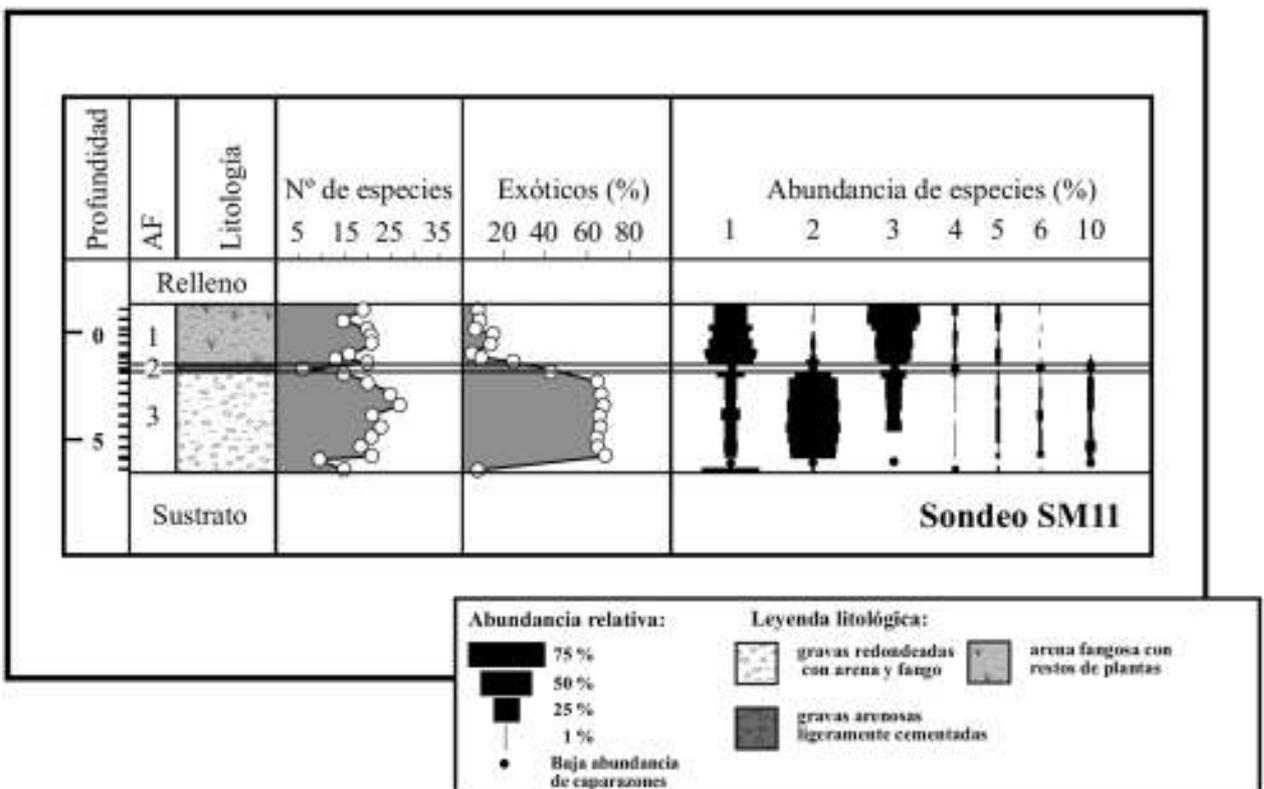


Figura 2-7: Secuencia sedimentaria, información micropaleontológica general, distribución y abundancia de las principales especies (1: *A. tepida*; 2: *C. lobatulus*; 3: *H. germanica*; 4: *C. oceanensis*; 5: *C. williamsoni*; 6: *R. anomala*; 10: *M. secans*) respecto a la profundidad (m) en el sondeo SM11 (estuario inferior) de la Ría de Bilbao. Las muestras tomadas y las Asociaciones de Foraminíferos aparecen también señaladas..

lus (media 33%, rango 11-51%), *R. irregularis* (media 19%, rango 2-41%) y *A. tepida* (media 13%, rango 6-25%). Las especies secundarias son *H. germanica* (media 6%, rango 2-13%) y *R. anomala* (media 4%, rango 0-9%). *Gaugryina rudis* (media 9%, rango 0-16%) también aparece como especie secundaria en los 4 m superiores de la zona. Contiene un número elevado de especies (media 24, rango 14-33), una abundancia moderada de caparazones (media 334 individuos/100g, rango 87-909) y un porcentaje muy alto de foraminíferos exóticos (media 75%, rango 55-87%). A -8,0m de profundidad se ha datado una muestra de madera que ha aportado una edad de 8390 años cal BP (Tabla 2-1). El índice α para esta asociación es >6 (Figura 2-13).

AF 2: está compuesta por 1,7 m de gravas arenosas ligeramente cementadas con un escaso número de caparazones de foraminíferos (media 30 individuos/100 g, rango 4-73). A -2,0 m de pro-

fundidad una muestra de concha aporta una edad de radiocarbono de 3020 años cal BP (Tabla 2-1).

AF 1: está representada por 2,5 m de arena fangosa con bioclastos. La asociación de foraminíferos está dominada por *C. lobatulus* (media 29%, rango 12-40%), *A. tepida* (media 26%, rango 15-35%) y *H. germanica* (media 13%, rango 7-17%).

Las especies *R. irregularis* (media 7%, rango 2-18%), *C. williamsoni* (media 3%, rango 1-7%), y *C. oceanensis* (media 2%, rango 0-4%) aparecen como componentes minoritarios. La abundancia de caparazones es moderada (media 30 individuos/100 g, rango 4-73), mientras que el número de especies (media 25, rango 23-26) y el contenido en foraminíferos exóticos (media 52%, rango 39-75%) son elevados. El índice α para esta asociación es >5 (Figura 2-13).

En total se han encontrado 10 especies indígenas y 57 especies exóticas en este sondeo.

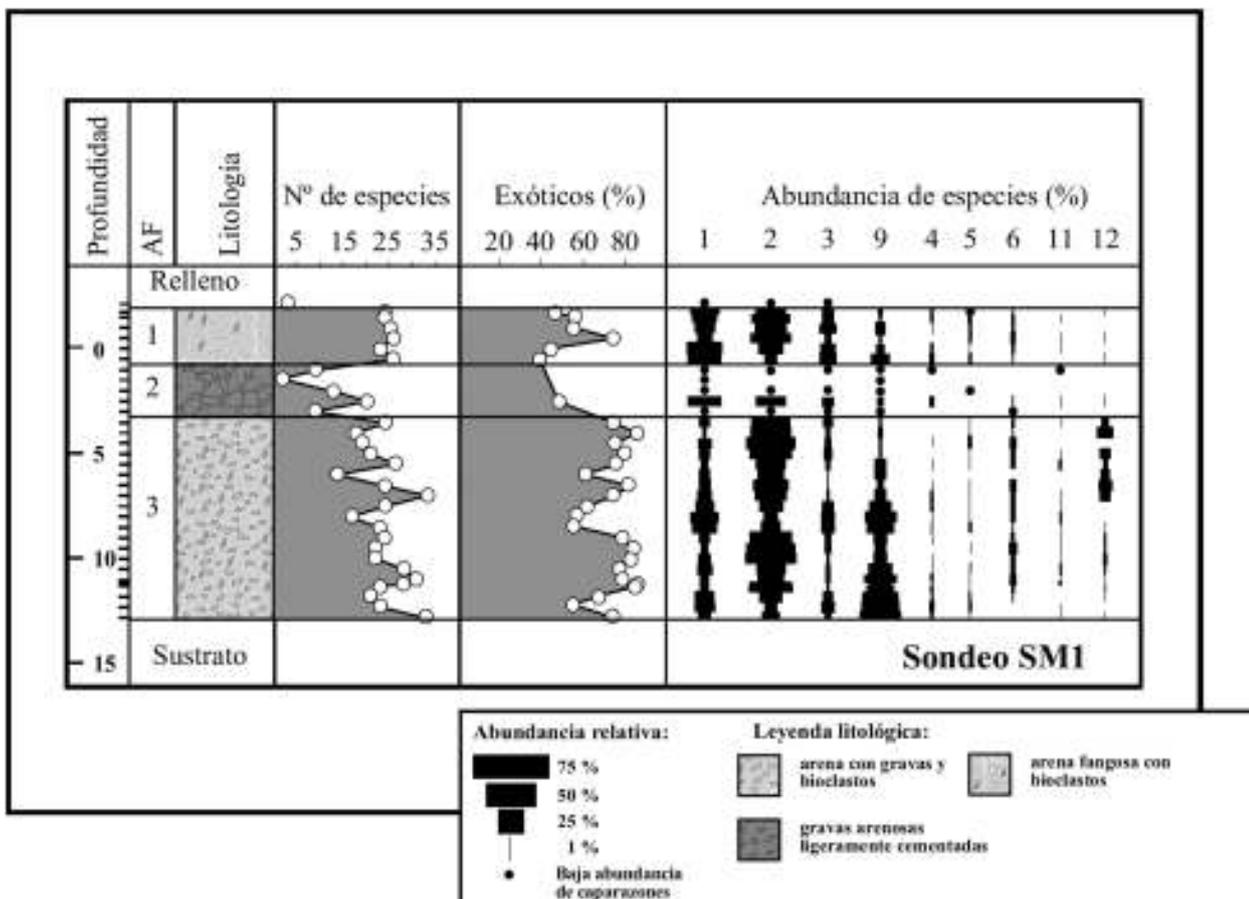


Figura 2-8: Secuencia sedimentaria, información micropaleontológica general, distribución y abundancia de las principales especies (1: *A. tepida*; 2: *C. lobatulus*; 3: *H. germanica*; 4: *C. oceanensis*; 5: *C. williamsoni*; 6: *R. anomala*; 9: *R. irregularis*; 11: *M. subrotunda*; 12: *G. rudis*) respecto a la profundidad (m) en el sondeo SM1 (estuero inferior) de la Ría de Bilbao. Las muestras tomadas y las Asociaciones de Foraminíferos aparecen también señaladas.

Sondeo SM13. La secuencia micropaleontológica de este sondeo se puede dividir en 2 zonas diferentes (Figura 2-10, Figura 2-14B).

AF 2: presente en la base del sondeo, se compone de 2,3 m de fangos arenosos rojizos, con gravas. La asociación está dominada por *A. tepida* (media 36%, rango 13-56%), *H. germanica* (media 25%, rango 13-34%) y *C. lobatulus* (media 13%, rango 3-39%). Las especies secundarias son *C. oceanensis* (media 6%, rango 1-18%), *C. williamsoni* (media 5%, rango 2-9%) y *R. irregularis* (media 4%, rango 0-9%). Contiene una abundancia moderada de especies (media 16, rango 13-23) y un porcentaje de foraminíferos exóticos bajo (media 23%, rango 6-64%). El número de caparazones es bajo (media 124 individuos/100 g, rango 79-264). El índice α para esta asociación es <4 (Figura 2-13).

AF 1: está formada por 6,8 m de arena fangosa con restos de plantas. La asociación de foraminíferos está dominada por *C. lobatulus* (media 47%, rango 16-60%), *H. germanica* (media 12%, rango 4-30%) y *A. tepida* (media 10%, rango 6-23%). Las especies *R. anomala* (media 4%, rango 2-7%), *M. secans*

(media 3%, rango 0- 10%), *R. irregularis* (media 3%, rango 0-7%) y *Textularia truncata* (media 2%, rango 0-4%) aparecen como componentes minoritarios. El número de especies es alto (media 24, rango 15-31) y el contenido en foraminíferos exóticos es muy alto (media 69%, rango 29-81%). A -6,1 m y -5,7 m de profundidad se han obtenido unas edades de 1910 y 1895 años cal BP (Tabla 2-1) respectivamente. Ambas muestras estaban compuestas por conchas. El número de caparazones es bajo (media 285 individuos/100 g, rango 18-495). El índice α para esta asociación es <6 (Figura 2-13).

En total se han encontrado 11 especies indígenas y 52 especies exóticas en este sondeo.

Sondeo S5. Dentro de la secuencia de este sondeo se pueden distinguir 2 Asociaciones de Foraminíferos (Figura 2-11, Figura 2-14B).

AF 2: presente en la base del sondeo, se compone de 15,2 m de arena fangosa y bioclástica con gravas y restos de plantas. La asociación está dominada por *R. irregularis* (media 32%, rango 15-46%), *C. lobatulus* (media 17%, rango 3-40%), *A. tepida*

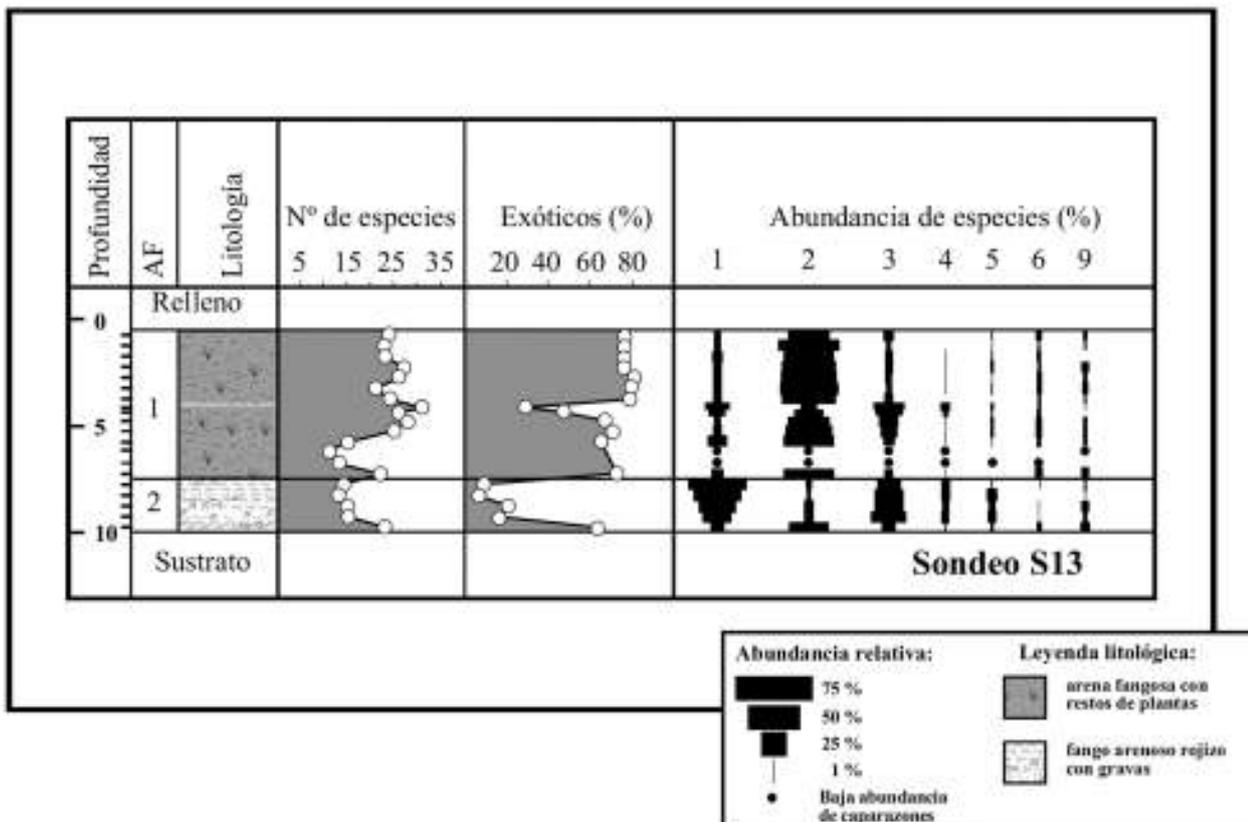


Figura 2-10: Secuencia sedimentaria, información micropaleontológica general, distribución y abundancia de las principales especies (1: *A. tepida*; 2: *C. lobatulus*; 3: *H. germanica*; 4: *C. oceanensis*; 5: *C. williamsoni*; 6: *R. anomala*; 9: *R. irregularis*) respecto a la profundidad (m) en el sondeo S13 (estuario inferior) de la Ría de Bilbao. Las muestras tomadas y las Asociaciones de Foraminíferos aparecen también señaladas.

(media 10%, rango 3-37%) y *H. germanica* (media 10%, rango 4- 18%). Las especies secundarias son *R. anomala* (media 3%, rango 0-15%), *C. oceanensis* (media 3%, rango 0-10%) y *M. subrotunda* (media 2%, rango 0-6%).

Esta zona contiene un número muy elevado de especies (media 27, rango 22-37) y de foraminíferos exóticos (media 70%, rango 50-85%). El número de caparazones es elevado (media 1217 individuos/100 g, rango 67-2307). El índice α para esta asociación es <7 (Figura 2-13).

AF 1: está formada por 10,3 m de arena fangosa bioclástica. La asociación de foraminíferos está dominada únicamente por *C. lobatulus* (media 48%, rango 26- 68%). *Ammonia tepida* (media 8%, rango

1-16%), *R. anomala* (media 6%, rango 0-20%), *H. germanica* (media 6%, rango 0-14%), *M. secans* (media 5%, rango 0- 14%) y *T. truncata* (media 3%, rango 0-6%) aparecen como especies secundarias.

El número de especies es moderado (media 20, rango 17-26) y el contenido en foraminíferos exóticos es muy alto (media 79%, rango 50-95%). A -4,1 m de profundidad una muestra compuesta por material conchífero ha sido datada por radiocarbono en 2810 años cal BP (Tabla 2-1). El número de caparazones es elevado (media 1591 individuos/100 g, rango 18-9378). El índice α para esta asociación es >5 (Figura 2-13).

En total se han encontrado 14 especies indígenas y 77 especies exóticas en este sondeo.

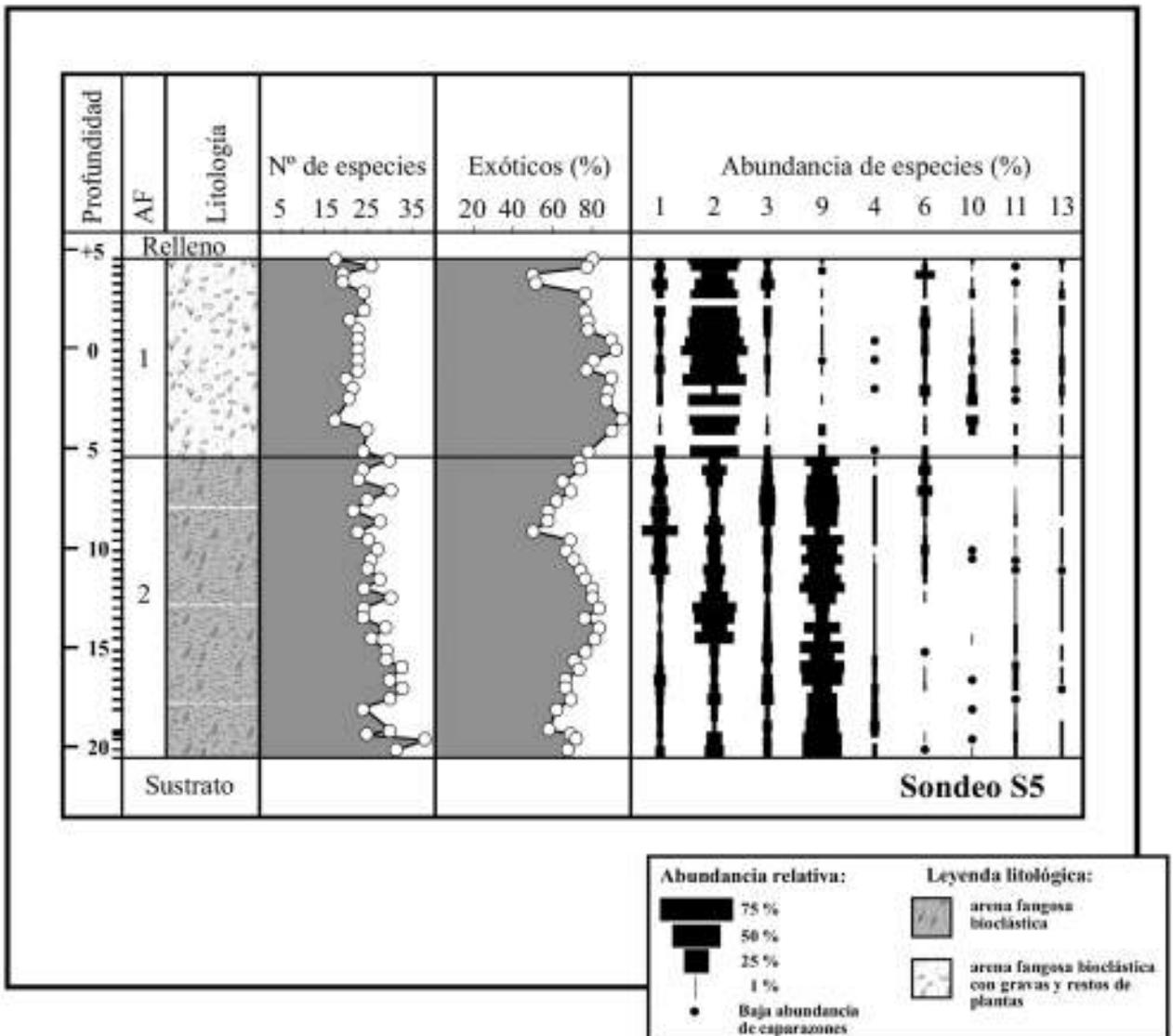


Figura 2-11: Secuencia sedimentaria, información micropaleontológica general, distribución y abundancia de las principales especies (1: *A. tepida*; 2: *C. lobatulus*; 3: *H. germanica*; 4: *C. oceanensis*; 6: *R. anomala*; 9: *R. irregularis*; 10: *M. secans*; 11: *M. subrotunda*; 13: *T. truncata*) respecto a la profundidad (m) en el sondeo S5 (frente marino) de la Ría de Bilbao. Las muestras tomadas y las Asociaciones de Foraminíferos aparecen también señaladas.

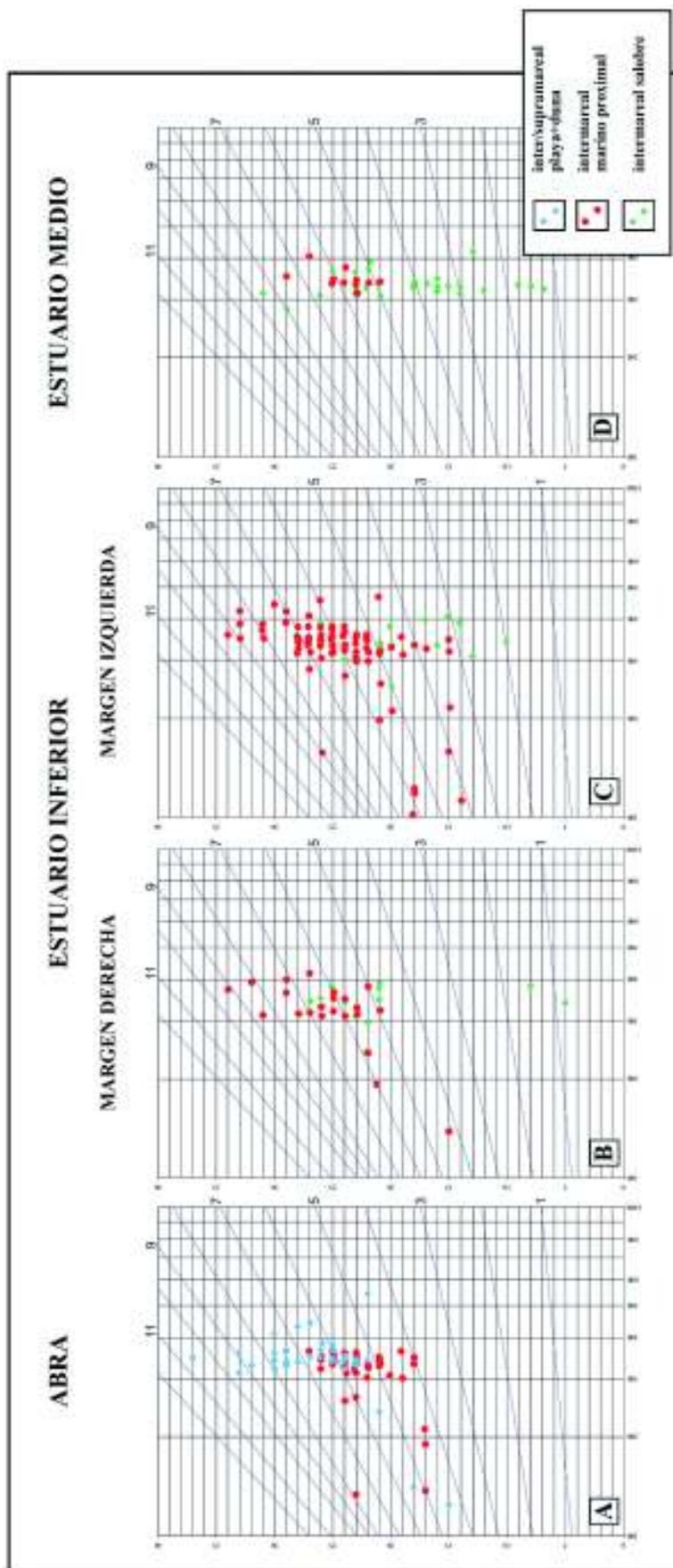


Figura 2-13: Resultados del índice de diversidad específica α agrupados por zonas. **A** Abra (sondeos S5 y LAS1); **B** Estuario inferior, margen derecha (sondeos S13 y S19); **C** Estuario inferior, margen izquierda (sondeos SM1, SM11 y SM13); **D** Estuario medio (sondeos SR6 y SR12).

2.2.c) Discusión

Identificación de diferentes subambientes en los sondeos. Trabajos micropaleontológicos previos en el relleno sedimentario Holoceno del estuario de Bilbao (Cearreta, 1998; Leorri y Cearreta, 2004) ya han identificado las especies dominantes y definido las asociaciones diagnósticas que caracterizan el registro de foraminíferos bentónicos en este área costera (Capítulo 1). La asociación indígena básica está constituida por: *A. tepida* y *H. germanica* junto con *C. oceanensis* y *C. williamsoni* en medios salobres, o con *B. britannica*, *B. pseudoplicata* y *Q. seminulum* en ambientes con clara influencia de mar abierto. Las especies de marisma *J. macrescens*, *T. inflata* y *A. mexicana* aparecen en las muestras, pero nunca de manera abundante en los sondeos del estuario medio e inferior. Este hecho es coherente con lo descrito por Cearreta (1998), donde las asociaciones de marisma baja sólo se encontraron en el parte superior de la Ría de Bilbao.

Por otra parte, el componente exótico está dominado por *C. lobatulus* junto con *R. irregularis*, *R. anomala*, *G. rudis*, *M. secans*, *T. truncata*, *Q. lata*, *M. subrotunda* y *E. crispum*. Estos robustos caparazones de foraminíferos han sido transportados dentro del estuario como carga de fondo y su presencia en las muestras, con diferentes porcentajes, es indicativo del variable grado de influencia marina en los diferentes tramos del sondeo.

En base a la abundancia de caparazones, predominio y diversidad de especies, las Asociaciones de Foraminíferos (AF) presentes en las diferentes secciones de estos sondeos pueden dividirse en distintos subambientes, que han evolucionado a lo largo del tiempo en las diferentes áreas de la Ría de Bilbao (Figuras 2-2 y 2-14A-B).

En los dos sondeos estudiados en la zona de Erandio (estuario medio) se han identificado 4 Asociaciones de Foraminíferos diferentes. Comenzando por la AF 4 en la base, que presenta un tamaño de grano grueso y muy pocos caparazones de foraminíferos, este tramo se interpreta como un medio fluvial de edad Tardiglaciaria. En la AF 3 aparece un contenido muy bajo en foraminíferos exóticos, y una asociación caracterizada por las especies *A. tepida*/*H. germanica*/*C. oceanensis*, que se interpreta como un medio salobre e intermareal de fango arenoso, que fue activo desde hace 8390 años cal BP. Hacia arriba en la secuencia, la AF 2 está dominada por la asociación exótica compuesta por *C. lobatulus*/*R. anomala*/*R. irregularis*, que define un medio marino-proximal, intermareal y arenoso. Este

medio se desarrolló, al menos, desde 4815 a 1220 años cal BP. Finalmente la AF 1 está dominada por la asociación indígena constituida por *A. tepida*/*H. germanica*/*C. williamsoni*, indicando un medio salobre, intermareal y de arena fangosa, que fue característico de esta zona estuarina hasta su ocupación humana en el siglo XIX.

Dentro de los tres sondeos analizados en la zona de Sestao (estuario inferior, margen izquierda), se distinguen tres Asociaciones de Foraminíferos. En la base, la AF 3 está dominada por foraminíferos exóticos, con un incremento de su abundancia hacia la boca del estuario desde el sondeo SM13 hasta el sondeo SM1. La asociación dominante, *C. lobatulus*/*R. anomala*/*R. irregularis*/*G. rudis*, es indicativa de un ambiente marino-proximal, intermareal y arenoso, mezclado con gravas fluviales Tardiglaciares en la base, que han sido retrabajadas durante la transgresión holocena. Este ambiente se desarrolló al menos desde 8520 hasta 3560 años cal BP. Las edades obtenidas en el sondeo SM13 de 1685 años cal BP y en el sondeo SM1 de 2225 años cal BP, se consideran demasiado jóvenes, y consecuentemente, inválidas si se comparan con los resultados obtenidos en las secciones superiores de los mismos sondeos (ver discusión sobre este tema en el apartado siguiente). Encima, AF 2 está formada por arena con gravas ligeramente cementada, con escasos caparazones de foraminíferos, y se interpreta como un ambiente submareal de alta energía que estuvo en funcionamiento en este área hace 3020 años cal BP. En la parte superior del sondeo, la AF 1 está dominada por la asociación indígena *A. tepida*/*H. germanica*/*C. williamsoni*/*C. oceanensis*, aunque los componentes exóticos presentes en esta AF incrementan su número significativamente hacia la boca del estuario desde el sondeo SM13 al SM1. Puede definirse como un ambiente salobre e intermareal de arena fangosa, que caracterizó este área estuarina desde hace, por lo menos, 1145 años hasta la ocupación de estos terrenos durante el siglo XIX.

En el relleno sedimentario de la zona de Lamiako (estuario inferior, margen derecha) aparece un incremento del contenido en foraminíferos exóticos desde las zonas más internas del estuario (sondeo S19) hacia las zonas más externas (sondeo S13). La asociación basal estudiada en los dos sondeos (AF 3 del sondeo S19 y AF 2 del sondeo S13) presenta un predominio de las formas indígenas *A. tepida*/*H. germanica*/*C. oceanensis*/*C. williamsoni*, indicativas de un ambiente de fango arenoso, salobre e intermareal que existió aquí desde 5140 años cal BP.

Posteriormente, se establece en esta zona un medio marino-proximal, intermareal y arenoso (AF 2 en el sondeo S19 y AF 1 en el sondeo S13) con predominio de la asociación exótica *C. lobatulus/R. irregularis/R. anomala*, junto con otras especies presentes hacia la boca del estuario, como *M. secans* y *T. truncata*. Este ambiente dominó en esta zona durante, al menos, los últimos 1910 años. Además, en la parte estuarina más interna de este área de Lamiako, la AF 1 del sondeo S19 sugiere el desarrollo de un medio arenoso, salobre e intermareal durante los últimos 205 años dominado por la asociación *H. germanica/A. tepida/C. williamsoni*.

Finalmente, la zona de Las Arenas (frente marino) presenta un relleno sedimentario continuo con dos Asociaciones de Foraminíferos diferentes en los dos sondeos analizados. La asociación basal (AF 2) presenta un gran predominio de foraminíferos exóticos, con una reducción del número de foraminíferos indígenas al incrementar la distancia con respecto al eje principal del estuario (desde el sondeo S5 al sondeo LAS1). La asociación dominante es *C. lobatulus/R. irregularis/R. anomala* acompañada de *E. crispum*, *G. rudis* y *M. subrotunda*. Esta AF 2 se interpreta como un depósito marino-proximal, intermareal y arenoso. Por encima se sitúa la AF 1, que también está fuertemente dominada por la misma asociación de foraminíferos exóticos aunque, en este caso, la presencia de gasterópodos terrestres y su elevada posición topográfica sugieren un medio deposicional arenoso, de salinidad normal de playa y dunas intermareales. Una datación de radiocarbono indica que este medio empezó a formarse hace 2810 años cal BP.

Historia ambiental holocena de la Ría de Bilbao.

La Autoridad Portuaria de Bilbao ha llevado a cabo numerosos estudios geotécnicos durante el periodo 1879-1995, mostrando que el espesor medio de la secuencia cuaternaria en la Ría de Bilbao varía enormemente desde los 10 m en el estuario superior, a 20 m en la zona media y a 30 m en las áreas estuarinas inferiores, con unas gravas arenosas basales de posible origen fluvial a lo largo del eje central del estuario pre-industrial original. Además, en la misma zona estuarina es posible encontrar el sustrato a profundidades muy variables, incluso en sondeos perforados muy próximos entre sí (Puertos del Estado, 1997).

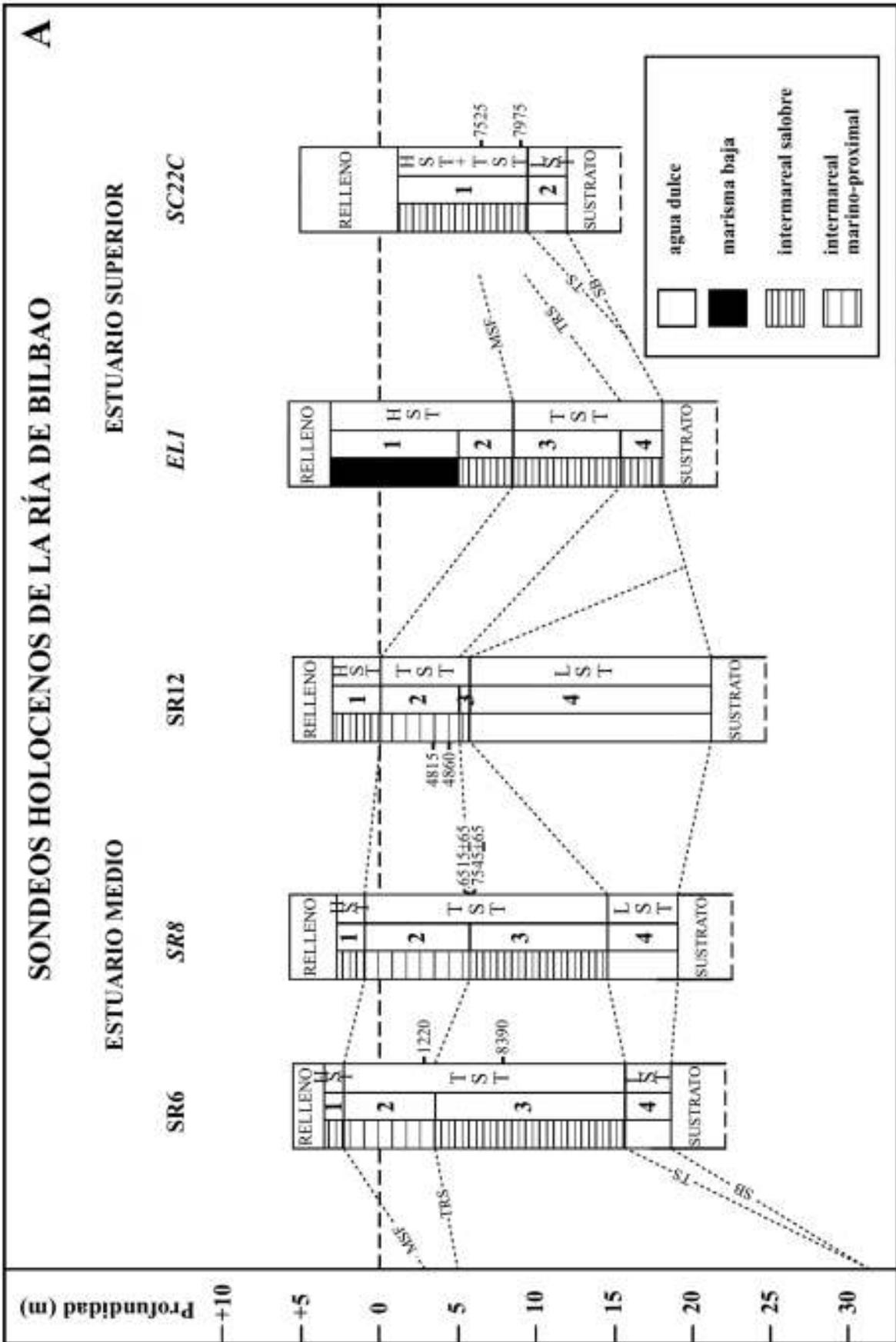
Los sedimentos que componen el relleno estuarino incluyen desde depósitos fluviales, pasando por sedimentos estuarinos salobres, a marino-proximales e incluso a materiales supramareales. El análisis de

los datos sedimentológicos y micropaleontológicos indica que, en general, los sondeos presentan unas secuencias granodecrecientes desde materiales con gravas en la base, sedimentos más arenosos en el centro hasta materiales más fangosos en el techo de la secuencia. A su vez, los materiales basales más gruesos aparecen prácticamente sin foraminíferos, mientras que en los sedimentos arenosos de la zona central las asociaciones de foraminíferos son marino-proximales, abundantes y con alta diversidad. Los depósitos fangosos superiores presentan asociaciones de foraminíferos salobres, abundantes y de baja diversidad. La interpretación micropaleontológica, junto con los resultados de las dataciones radiométricas, sugieren que los materiales basales son depósitos fluviales tardiglaciares-inicio del Holoceno, seguidos por materiales transgresivos durante el Holoceno inferior-medio, cubiertos a su vez por los depósitos regresivos del Holoceno superior. Esta tendencia general aparece de manera más clara en la zona media del estuario (Erandio), y sus características sedimentológicas y micropaleontológicas varían dependiendo de su localización paleogeográfica: un incremento de sedimentos fangosos y la ausencia de elementos de influencia marina son característicos del estuario superior, mientras que el incremento de sedimentos arenosos y el retrabajamiento de los materiales fluviales basales son típicos de la zona inferior del estuario.

Esta secuencia sedimentaria se inició con el descenso glacio-eustático del nivel del mar ocurrido durante el Pleistoceno superior y se ha depositado desde entonces.

Este intervalo representa un ciclo eustático aproximadamente de cuarto orden (Vail *et al.*, 1991). Aunque esta secuencia carece del límite superior de secuencia, contiene todos los elementos característicos de las secuencias deposicionales, incluyendo un Límite de Secuencia basal (SB), un Cortejo Sedimentario de Nivel del Mar Bajo (LST), un Cortejo Sedimentario Transgresivo (TST), una Superficie Transgresiva (TS), una Superficie de Máxima Inundación (MFS) y un Cortejo Sedimentario de Nivel de Mar Alto (HST). Además de estas superficies clave, que definen los cortejos sedimentarios, también se pueden distinguir otros rasgos significativos, como la Superficie de *Ravinement*. Las Asociaciones de Foraminíferos (AF) definidas en los sondeos se pueden interpretar siguiendo este modelo de secuencias deposicionales (Figura 2-14).

La Figura 2-15 muestra esquemáticamente la interpretación, en base a la Estratigrafía de



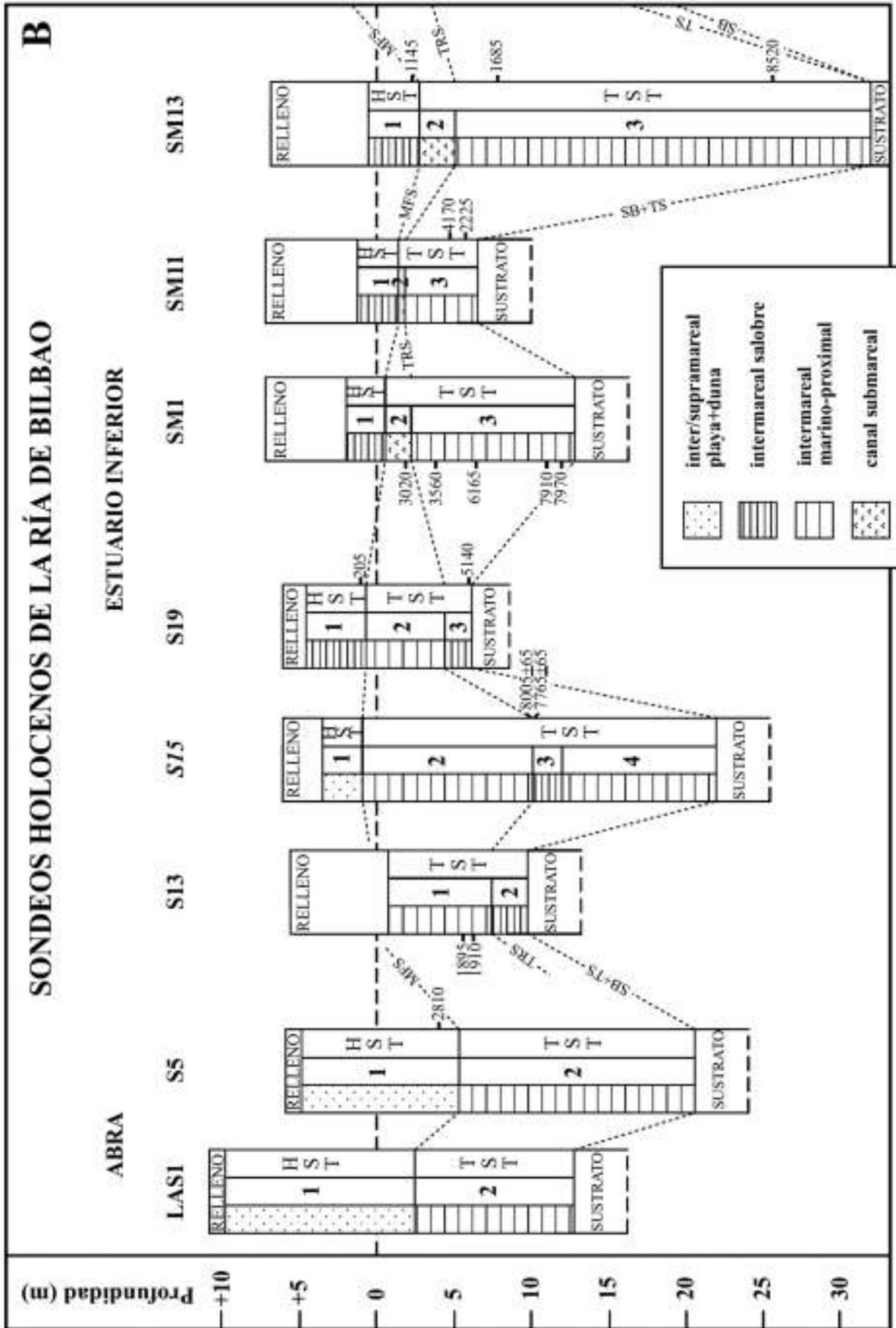


Figura 2-14 (A-B): Interpretación paleoambiental de los sondeos de la Ría de Bilbao basada en las asociaciones de foraminíferos. A: Estuario medio y superior; B: Estuario inferior y Abra. Los sondeos estudiados previamente por Cearreia (1998) se presentan en cursiva. Las dataciones de radiocarbono también aparecen indicadas. LST: corchero sedimentario transgresivo; HST: corchero sedimentario de nivel del mar alto; SB: límite de secuencia; TS: superficie transgresiva; MFS: superficie de máxima inundación; TRS: superficie de *ravinement*. La profundidad está referida al nivel de mar local. 1-4: Asociaciones de Foraminíferos (AF).

Secuencias, del relleno sedimentario de la Ría de Bilbao. Esta interpretación está basada en las asociaciones de foraminíferos presentes en los sondeos perforados para la construcción del Ferrocarril Metropolitano de Bilbao en la orilla derecha del estuario (Figura 2-2). Algunos de los sondeos presentes en el esquema han sido analizados micropaleontológicamente y sus resultados se presentan en este volumen y en Cearreta (1998), mientras que el resto han sido interpretados por comparación directa gracias a su proximidad espacial.

El límite de secuencia (SB) se define por la disposición de arenas y gravas cuaternarias no-consolidadas sobre el sustrato cretácico. Esta superficie está recubierta por un depósito fluvial de gravas y arena gruesa que se corresponde con la AF basal en las zonas media y superior del estuario (Figuras 2-14A y 2-15).

Estos depósitos fluviales, donde los foraminíferos prácticamente son inexistentes, son interpretados como el cortejo de nivel del mar bajo (LST). Debido a la ausencia de material carbonatado, este LST no ha podido ser datado, pero su posición estratigráfica por debajo de los depósitos estuarinos del Holoceno inferior sugiere una edad Tardiglaciario-inicio del Holoceno. En la zona estuarina inferior estos sedimentos de grano grueso han sido retrabajados durante la transgresión holocena y, consecuentemente, incluidos en el siguiente cortejo sedimentario (Figuras 2-14A y 2-15).

La acumulación de sedimentos estuarinos, con un gran contenido de foraminíferos sobre los depósitos fluviales de grano grueso, sugiere claramente una transgresión marina dentro del valle fluvial. Se han depositado diferentes Asociaciones de Foraminíferos durante este intervalo transgresivo, presentando todas ellas un incremento en el número de foraminíferos exóticos. Consecuentemente, parecen indicar un incremento de la influencia marina en la vertical del sondeo, conforme progresa la transgresión a lo largo del tiempo. Estas Asociaciones de Foraminíferos comprenden el cortejo sedimentario transgresivo (TST) limitado por diferentes superficies (Figuras 2-14A-B y 2-15). La superficie transgresiva (TS) puede definirse en la base de estos depósitos estuarinos separándolos de los materiales más groseros del LST. Al avanzar la transgresión, los materiales estuarinos son recubiertos por sedimentos procedentes de la plataforma interna (predominando los foraminíferos exóticos), incrementando así las condiciones marino-proximales dentro del estuario.

La superficie que separa las condiciones salobres de las marinas es de carácter erosional y se denomina superficie de *ravinement* (TRS) (Allen y Posamentier, 1993). Esta TRS ha sido identificada previamente, en este y otros estuarios de la costa cantábrica, como una superficie de solapamiento transgresivo (TOB) por Cearreta (1998) y Cearreta y Murray (1996, 2000). Las dataciones obtenidas en este TST varían desde 8520 a 1685 años cal BP.

Algunas de las dataciones radiométricas registradas en estos sondeos muestran una relación inversa con otras dataciones dentro de la misma secuencia sedimentaria (ejemplo: en el sondeo SM11, donde una muestra topográficamente más alta presenta una edad mucho más antigua que otra muestra situada topográficamente más abajo en la columna estratigráfica). Este resultado inesperado también ha sido encontrado en otros estuarios del Cantábrico por Cearreta y Murray (2000) y explicado como consecuencia de un importante retrabajamiento de los materiales más antiguos, asociado a episodios transgresivos de alta energía en esta zona costera durante el Holoceno. De igual modo, dataciones convencionales de la TRS en los sondeos SR8 y S15 (Figura 2-14A-B) son consideradas irreales por los mismos autores. Así mismo, concluyen que las dataciones realizadas en estuarios bajo condiciones de alta energía deben tomarse con precaución, particularmente en los sondeos perforados cerca de la desembocadura del estuario, donde puede esperarse un mayor error si se comparan con las dataciones realizadas en la cabecera del estuario.

Diferentes curvas del nivel marino propuestas para el Golfo de Bizkaia muestran que el mar alcanzó el nivel actual hace aproximadamente 3000 años BP (Pirazzoli, 1991). La respuesta sedimentaria a esta estabilización del nivel del mar fue el cambio de una transgresión eustática a una regresión relativa, con el depósito de materiales similares a los de la capa inferior del TST, pero conteniendo ahora foraminíferos indicativos de un medio salobre y somero. Las Asociaciones de Foraminíferos más altas en los sondeos constituyen el cortejo sedimentario de nivel del mar alto (HST) (Figuras 2-14A-B y 2-15). La superficie presente entre el HST y el TST representa la superficie de máxima inundación (MFS). Las dataciones radiométricas obtenidas para los materiales del HST indican que éste es posterior a los 2810 años cal BP.

El cuadro en la Figura 2-15 representa la variación de la profundidad del fondo estuarino a lo largo del tiempo, en base a las dataciones radiométricas

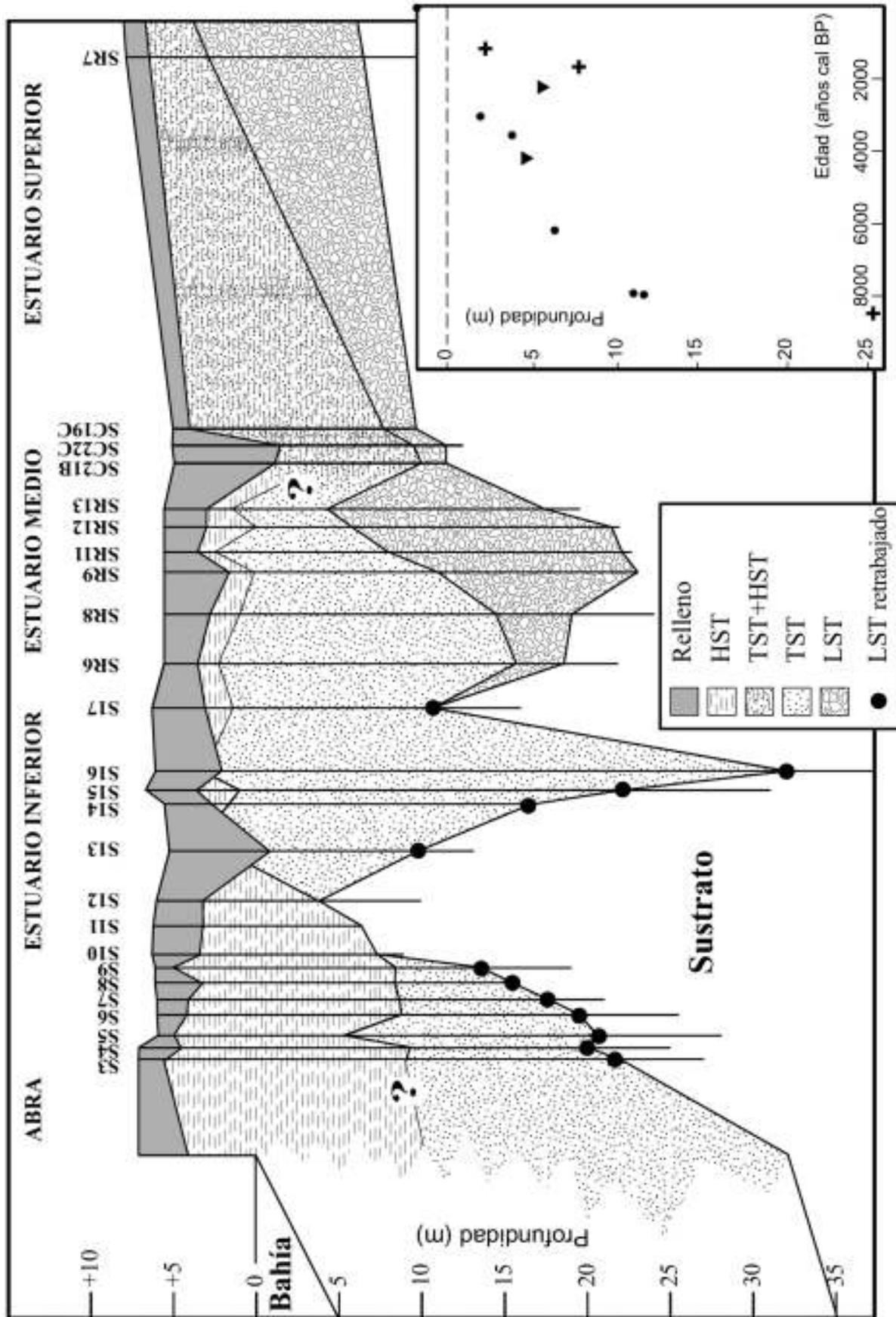


Figura 2-15: Interpretación de la secuencia estratigráfica de los depósitos holocenos de la Ría de Bilbao. Las líneas verticales indican la localización de los sondeos en la margen derecha del estuario perforados durante el estudio geológico realizado para la construcción del Ferrocarril Metropolitano de Bilbao. LST: cortejo sedimentario de nivel de mar bajo; TST: cortejo sedimentario de nivel de mar alto. La profundidad está referida al nivel de mar local. El cuadro representa la profundidad del fondo estuario a través del tiempo. Los puntos negros, triángulos y cruces son las dataciones de radiocarbono obtenidas de los sondeos SM11, SM11 y SM13 respectivamente situados en la zona izquierda de la zona inferior del estuario.

de las muestras procedentes de los sondeos de la margen izquierda del estuario inferior (Sestao: sondeos SM1, SM11 y SM13, donde las dataciones realizadas son más abundantes). La posición de los puntos sugiere dos fases diferentes en el proceso de relleno: una rápida fase inicial, que corresponde cronológicamente al TST, seguida por una segunda fase más lenta, topográficamente próxima al 0 del nivel del mar actual, que representa el HST. Es imposible diferenciar el TST y el HST en las zonas estuarinas superiores, debido a la ausencia de elementos claramente marinos durante el Holoceno medio a una distancia tan grande de la desembocadura del estuario (Cearreta, 1998) (Figuras 2-14A y 2-15).

Variaciones del nivel marino y cambios ambientales costeros durante el Holoceno en el Golfo de Bizkaia. La zona litoral del Golfo de Bizkaia es una típica costa de inundación, formada como consecuencia del ascenso del nivel del mar que siguió a la última deglaciación. Los procesos erosivos son dominantes a lo largo del área sur (Costa Cantábrica), como resultado del ataque de las olas que va provocando la continua destrucción de los acantilados. Diferentes sondeos perforados en las principales zonas estuarinas de este área han sido estudiados durante los últimos años, tal y como se describe en el apartado 1.2. En la Ría de Santoña (Figura 2-2), Cearreta y Murray (1996) concluyen que el ascenso relativo del nivel del mar parece ser más escalonado que continuo en este estuario. El intento de datar la superficie TOB identificada utilizando caparazones de foraminíferos indígenas (Cearreta y Murray, 2000), aportó unos datos no válidos debido al intenso retrabajamiento de los caparazones de los foraminíferos asociados a este episodio transgresivo (ver apartado 1.2).

En el estuario de Gernika (Figura 2-2) (apartado 1.2) Pascual *et al.* (1998, 1999, 2000a, 2000b, 2001, 2002) distinguen tres fases diferentes en el relleno del estuario. La primera está caracterizada por una mezcla de condiciones marinas y estuarinas, dataadas dentro de un rango que oscila desde más antiguas que 6410 ± 70 hasta 3740 ± 60 años convencionales BP. La segunda fase representa un aumento transgresivo que tiene lugar entre los 3410 ± 60 y 3250 ± 40 años convencionales BP.

La fase final está marcada por una activa sedimentación caracterizada por el relleno de los canales estuarinos, el incremento de las marismas vegetadas y el descenso en la diversidad de las microfaunas (foraminíferos y ostrácodos).

Por último, en el estuario del Bidasoa (Figura 2-2), Cearreta (1994) (apartado 1.2) encuentra una super-

ficie transgresiva TOB, comparable a la arriba citada, separando dos secuencias de somerización. La secuencia superior presenta una somerización hasta alcanzar las marismas actuales. En la secuencia inferior los depósitos basales se dataron radiométricamente obteniendo una edad de 7810 ± 130 años convencionales BP, y demostrando que el estuario se ha ido formando desde entonces. Una única datación radiométrica sobre la TOB ofreció una edad de 2740 ± 90 años convencionales BP.

Por otra parte, el área este del Golfo de Bizkaia (Costa de Aquitania) es básicamente una playa arenosa, recta y continua, tras la cual se dispone un sistema de dunas costeras fijado durante el siglo XIX. Estos extensos campos de dunas se formaron cuando los depósitos de arena de la plataforma continental fueron retrabajados durante el ascenso holoceno del nivel del mar. Se han diferenciado dos generaciones de dunas: dunas primarias, que se iniciaron sobre 3000-2300 años BP y dunas modernas, que fueron activas entre 1500 y 200 años BP (Tastet y Pontee, 1998).

Un conjunto de pequeños sondeos (que no alcanzan el sustrato) obtenidos en la parte norte de la laguna costera de Arcachon (Figura 2-2) permiten reconocer tres fases de relleno en este lagoon durante los últimos 5000 años (Klingebiel y Gayet, 1995). Inicialmente, se depositaron sedimentos fangosos y arenas intermareales de origen marino entre 5000 y 2500 años BP, seguidos por la aparición de canales mareales transgresivos rellenos con secuencias de arenas conchíferas datadas entre 2600 y 1500 años BP. Finalmente, se desarrollaron llanuras fangosas biogénicas intermareales más restringidas y los canales mareales actuales. Estos autores concluyen que, por regla general, hubo un ascenso gradual del nivel del mar, que se habría desarrollado muy lentamente durante los últimos 2000 años, a lo largo de la costa atlántica francesa, donde no hay evidencias de que se haya producido un ascenso del mar por encima del nivel actual.

Basándose en la información obtenida a partir de diversos sondeos y datos hidrológicos, Allen y Posamentier (1993) describen las litofacies y la arquitectura estratigráfica del relleno del estuario de la Gironde (Figura 2-2) durante el Holoceno. Proponen un modelo de secuencias estratigráficas para este área estuarina, organizando el amplio abanico de litofacies encontrado en tres cortejos sedimentarios separados por superficies estratigráficas continuas. No presentan dataciones y, consecuentemente, la evolución ambiental no está localizada en el tiempo.

En cualquier caso, según Fairbanks (1989), la máxima inundación de este estuario se alcanzó hace aproximadamente 4000 años BP. Más recientemente, Diot y Tastet (1995) y Ponte *et al.* (1997) han estudiado la palinología y la de seis pequeños sondeos (máxima profundidad 7,7 m, sin alcanzar el sustrato), mostrando el relleno progresivo de los canales mareales de un afluente situado en la parte inferior del estuario de la Gironde (Península de Medoc) durante los últimos 6700 años. Su conclusión es que este área se convierte en una marisma continental durante los últimos 2000 años, después de la formación del Cordón de Richard. Este depósito de naturaleza carbonatada está formado por arena, cantos y conchas, y ha sido datado entre 2575 ± 120 y 1421 ± 162 años convencionales BP.

Observaciones en la plataforma interna adyacente a la desembocadura del estuario de la Gironde (aproximadamente 50 m de columna de agua), mostraron que el depósito de fangos en esa zona comenzó alrededor de 2000 años BP (basado en dataciones radiométricas y análisis palinológicos, en Lesueur *et al.*, 1996), ilustrando que los sedimentos fluviales procedentes de La Gironde comenzaron a acumularse en la plataforma a partir de ese momento (Lesueur *et al.*, 2002).

Finalmente, los sedimentos y microfósiles (ostrácos) contenidos en la secuencia sedimentaria marismosa de La Perroche (Figura 2-2), han sido estudiados por Clavé *et al.* (2001) a través de ocho sondeos largos que mostraron la progresiva invasión marina de este área. Esta invasión marina refleja un evento transgresivo final datado entre 3600 y 2100 años BP. Este evento se correlaciona con el Cordón de Richard y se interpreta como un episodio de ascenso del nivel del mar y/o un incremento del oleaje. La marisma quedó definitivamente aislada después de 2100 años BP, y el desarrollo de una extensa turbera sugiere un periodo final de nivel marino estable.

El origen de las principales variaciones del nivel marino puede encontrarse en el movimiento eustático global, en el ascenso holoceno (producido por la deglaciación durante los últimos 10000 años), en la subsidencia o en el levantamiento local de los márgenes continentales, consecuencia de la actividad tectónica asociada con el movimiento de placas (Klingebiel y Gayet, 1995).

Aunque los movimientos de elevación tectónica han sido utilizados para explicar aspectos de la evolución del margen sur del Golfo de Bizkaia durante el Neógeno y el Pleistoceno (Mary, 1983), desafortunadamente

no hay ningún estudio relevante sobre el neotectonismo holoceno en esta región. En la costa de Aquitania, la contribución de la subsidencia tectónica a la tendencia general transgresiva ha sido evaluada en el orden de $0-0,7 \text{ mm año}^{-1}$ (Klingebiel y Gayet, 1995). Este hecho nos permite deducir posibles interferencias significativas entre los movimientos tectónicos verticales y el eustatismo en el Golfo de Bizkaia durante el Holoceno.

Consecuentemente, se puede concluir que las diferentes secuencias sedimentarias costeras y las dataciones radiométricas obtenidas durante los últimos años en el Golfo de Bizkaia, indican que siguiendo el ascenso del nivel del mar postglaciar, los estuarios modernos en la región comenzaron a desarrollarse hace unos 8500 años BP. Además, una segunda secuencia de somerización comenzó hace unos 3000 años BP, cuando el nivel del mar alcanzó una posición similar a la actual después de un último evento transgresivo datado en esa época.

2.3. Meandro abandonado de Barakaldo

Hazera (1968, 1977) menciona por primera vez la existencia de un meandro abandonado formado por el río Nervión alrededor de Barakaldo, y localizado en la zona media de la Ría de Bilbao. Este meandro presenta unos dos kilómetros y medio de anchura máxima, el doble que los meandros presentes río arriba (Capítulo 1). Sus formas características se han conservado muy bien, con claras señales de escarpado de orilla cóncava a pie del monte Rontegi, en la base del monte Cabras (Elorrieta) y en Sestao, mientras que en la zona entre Retuerto y Ugarte estos signos son menos evidentes (Figuras 2-16 y 2-17). El seccionamiento de este meandro no se cree consecuencia del proceso de estrangulamiento fluvial, sino que parece derivado de los procesos erosivos provocados por los ríos Asua (en la margen derecha) y Kadagua (en la margen izquierda). La escasa potencia del relleno sedimentario del meandro en la zona entre Retuerto y Ugarte (10 m) (Figura 2-20), comparada con la que existe río arriba, sugiere una escasa excavación erosiva del río pleistoceno, lo que parece indicar que el abandono del meandro tuvo lugar antes del Holoceno (Hazera, 1968). Esto ha llevado a pensar que los materiales que rellenan el meandro podrían ser más antiguos que los sedimentos presentes en el relleno del resto de la Ría de Bilbao.

El principal objetivo de este apartado es realizar una reconstrucción ambiental del meandro de Barakaldo desde su formación, a través del análisis

del contenido micropaleontológico (foraminíferos bentónicos) de dos sondeos de rotación obtenidos en las áreas ocupadas del meandro (Figura 2-17), y su integración en el esquema global de la evolución cuaternaria de la Ría de Bilbao.

Se han realizado dataciones de radiocarbono y análisis polínicos preliminares con el fin de localizar en el tiempo los diferentes paleoambientes y episodios identificados en los sondeos.



Figura 2-16: Mapa del meandro abandonado (Hazera, 1968). El trazado original se presenta en marrón.

2.3.a) Materiales y Métodos

Las secuencias sedimentarias analizadas en este apartado se obtuvieron en octubre de 1996 como parte de un estudio de ingeniería civil llevado a cabo dentro de las instalaciones de Altos Hornos de Vizcaya, S.A. en la vega de Ansio (ANS1 y ANS2) (Figura 2-17). Las profundidades están referidas al nivel local del mar. Los dos sondeos fueron realizados utilizando una perforadora de rotación, que produjo un sondeo de aproximadamente 10 cm de diámetro, alcanzando en ambos casos el sustrato cretácico. Las muestras para el análisis micropaleontológico se tomaron aproximadamente cada 25 cm.

Sondeo ANS1:

Localización: 500795/4793200

Longitud: 12,50 m.

Cota: +9,30 m sobre el nlm.

Sustrato: alcanzado a -2,01 m.

Sondeo ANS2:

Localización: 500651/4792863

Longitud: 13,10 m.

Cota: +7,50 m sobre el nlm.

Sustrato: alcanzado a -3,00 m.

Estos sondeos están compuestos por gravas con arenas y fangos en la base, arena fangosa y fango arenoso componen los materiales intermedios y presentan material arcilloso en el techo. Se han analizado 18 y 20 muestras respectivamente. En el laboratorio, estas muestras fueron preparadas siguiendo los mismos procesos descritos para el resto de las muestras analizadas en este capítulo.

Con el fin de completar el estudio en esta zona hoy marginal de la Ría de Bilbao, se tomaron 4 muestras superficiales en un área próxima para poder conocer la situación ambiental presente actualmente en la zona. Dos de las muestras (IBT1 e IBT2) se tomaron estacionalmente en la llanura intermareal del río Galindo (uno de los principales afluentes que descargan en la ría, ver Capítulo 1) en Junio 1997 y Octubre 1997, y otras 2 muestras en un zona de carrizal adyacente (IBT3 e IBT4) en Junio 1997 (Figura 2-17). La recogida de muestras y su preparación en el laboratorio siguieron el proceso descrito para las muestras superficiales en el apartado 1.1.c (Capítulo 1)

En total, han sido estudiadas 44 muestras y aproximadamente 6500 foraminíferos.

Las dataciones por radiocarbono de dos muestras de concha se han realizado en Beta Analytic Inc. (USA). Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 2-1.

2.3.b) Resultados

Muestras superficiales. Como ya hemos visto en el Capítulo 1, gracias al uso del Rosa de Bengala, las 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 formadas a lo largo del tiempo y que derivan de las asociaciones vivas mediante la producción y muerte de los individuos, además de las posibles modificaciones post mortem de los caparzones.

Asociaciones vivas

En la Ría de Bilbao, los valores de abundancia de individuos en las muestras son extremadamente

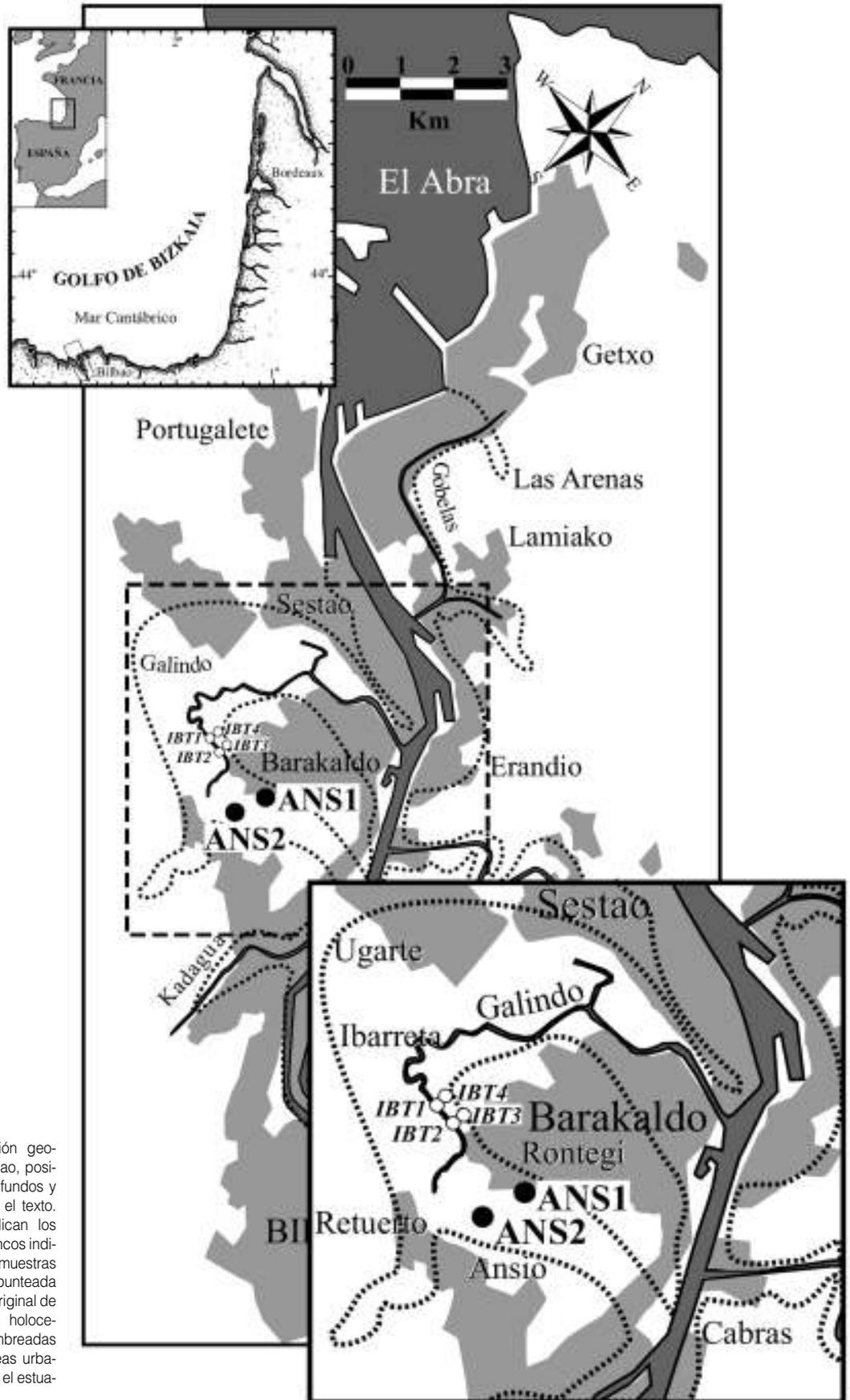


Figura 2-17: Localización geográfica de la Ría de Bilbao, posición de los sondeos profundos y localidades referidas en el texto. Los puntos negros indican los sondeos. Los puntos blancos indican la posición de las muestras superficiales. La línea punteada representa la extensión original de los dominios estuarinos holocenos. Las superficies sombreadas en gris claro son las áreas urbanas. El gris oscuro indica el estuario actual y el mar.

te bajos en todas las estaciones de muestreo y varían enormemente a lo largo del canal mareal con un aparente gradiente negativo desde la desembocadura hacia la cabecera del estuario (Cearreta *et al.*, 2000). Esto concuerda con lo encontrado en las muestras aquí analizadas, donde sólo en aquellas situadas en la llanura intermareal del canal (IBT1 e IBT2) (Figura 2-17) aparecen foraminíferos vivos. Al igual que en el resto de la ría, la abundancia es extremadamente baja, variando entre 0 foraminíferos vivos en las muestras IBT1 Octubre 1997 e IBT2 Junio 1997, 1 individuo en IBT2 Octubre 1997 y 3 especímenes en IBT1 Junio 1997. Sólo se han encontrado 3 especies vivas, *H. germanica*, *Criboelphidium excavatum* y *Q. seminulum*, también presentes en el resto del estuario, y que, al igual que en el resto de las muestras, se consideran transportadas vivas dentro de la ría por las corrientes mareales (Cearreta *et al.*, 2000).

Asociaciones muertas

Como ya se ha visto en el anteriormente, las asociaciones vivas y las muertas generalmente difieren entre sí por diversos motivos. En el caso particular de la Ría de Bilbao estos cambios se deben al transporte efectivo de material sedimentario (incluidos caparazones de foraminíferos) desde la plataforma interna hacia el interior de la ría, como se muestra en Cearreta *et al.* (2000).

De los sedimentos superficiales analizados para este apartado, sólo presentaban caparazones las muestras situadas en el canal mareal (IBT1 e IBT2) (Figura 2-17).

Al igual que en el resto de las muestras de la Ría de Bilbao (Cearreta *et al.*, 2000), el número de caparazones encontrado es muy bajo, a pesar de lo cual aparecen más caparazones y más especies en la asociación muerta que en la asociación viva, con una apreciable variabilidad, que va de 0 caparazones en la muestra IBT2 Junio 1997 a 10 en la muestra IBT1 Octubre 1997. Las especies encontradas son *A. tepida*, *B. britannica*, *H. germanica*, *J. macrescens* y *A. mexicana*. Todas estas especies también han aparecido en muestras superficiales del eje principal de la ría.

En resumen, se han extraído solamente 18 foraminíferos (4 individuos vivos y 14 caparazones) agrupados en 7 especies distintas que se encuentran listadas en el Apéndice 4-A. De estas especies 2 sólo aparecen vivas (*C. excavatum* y *Q. seminulum*) y 4 sólo muertas (*A. tepida*, *B. britan-*

nica, *J. macrescens* y *A. mexicana*), quedando una única especie (*H. germanica*) que aparece tanto viva como muerta. En la muestra IBT1 Octubre 1997 también han aparecido tecamebas y en la muestra IBT3 Junio 1997 un gasterópodo. Las muestras IBT3 e IBT4 (carrizal) no contenían foraminífero alguno.

Sondeos

Sondeo ANS1

En función de su contenido en foraminíferos, este sondeo puede dividirse en 2 zonas diferentes (Tabla 2-4 y Figura 2-18). En la base, la Asociación de Foraminíferos AF2 está compuesta por 4,1 m de arena fangosa, con fragmentos de bioclastos, incrementándose el contenido de fango hacia techo. Presenta, a su vez, dos intercalaciones de material más grueso: 2,35 m de gravas a la base y 0,3 m de arena gruesa a +1,97 m. Igualmente, esta asociación puede subdividirse en función de la abundancia de foraminíferos en 4 subzonas. La subzona 2d comprende los 2,35 m basales. Presenta muy pocos caparazones de foraminíferos (media 100 caparazones/100 g, rango 27-306). Está dominada exclusivamente por *A. tepida* (media 96%, rango 96%). No hay presencia de foraminíferos exóticos, el número de especies es muy bajo (media 4, rango 3-6), dominan los caparazones hialinos (media 99,8%) y el índice α es >1 (Figura 2-19 y Tabla 2-4). La subzona 2c comprende los siguientes 1,15 m. Presenta pocos caparazones de foraminíferos (media 294 caparazones/100 g, rango 140-570), con un predominio de *A. tepida* (media 95%, rango 94-96%) junto con *H. germanica* como especie secundaria (media 4%, rango 3-6%). El número de foraminíferos exóticos es extremadamente bajo (media 0,1%, rango 0,1%), dominan los caparazones hialinos (media 99%) y el número de especies es muy bajo (media 4, rango 3-5) lo que equivale a un índice α de <1 (Figura 2-19 y Tabla 2-4). Hacia techo, la subzona 2b comprende 0,3 m donde el número de caparazones es muy bajo (media 69 caparazones/100 g, rango 63-76), con *A. tepida* como componente principal. Hay una ausencia total de foraminíferos exóticos, predominan los caparazones hialinos y presenta un número de especies muy bajo (media 4). Finalmente, la subzona 2a, que comprende los 0,3 m superiores, contiene un número de caparazones elevado (media 1334 caparazones/100 g, rango 721-1947). El número de foraminíferos exóticos es extremadamente bajo (media 0,1%, rango 0,1%) y predominan los caparazones

hialinos (media 100%). El número de especies es muy bajo (media 2, rango 2-3).

La asociación está dominada por *A. tepida* (media 88%, rango 82-93%) y *H. germanica* (media 13%, rango 7-18%). El índice α para esta zona es <1 (Figura 2- 19 y Tabla 2-4).

AF1: Comprende los 1,20 m superiores compuestos por arcilla compacta de colores rojizos, donde no aparecen caparazones de foraminíferos.

En total se han encontrado 7 especies indígenas y 6 exóticas en este sondeo.

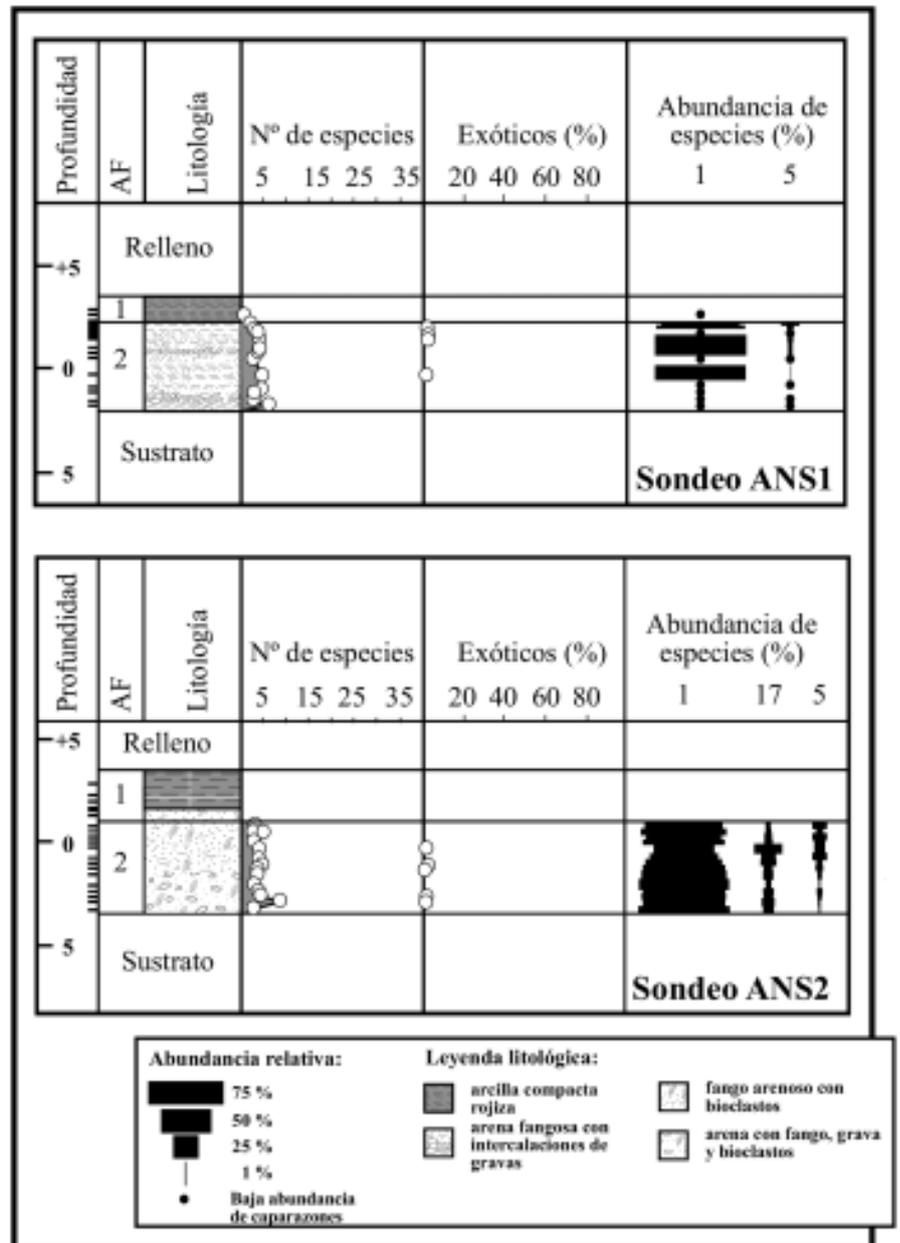


Figura 2-18: Secuencia sedimentaria, información micropaleontológica general, distribución y abundancia de las principales especies (1: *A. tepida*; 5: *H. germanica*; 17: *C. excavatum*) respecto a la profundidad (m) en los sondeos ANS1 y ANS2 (meandro abandonado de Barakaldo) de la Ría de Bilbao. Las muestras tomadas y las Asociaciones de Foraminíferos aparecen también señaladas.

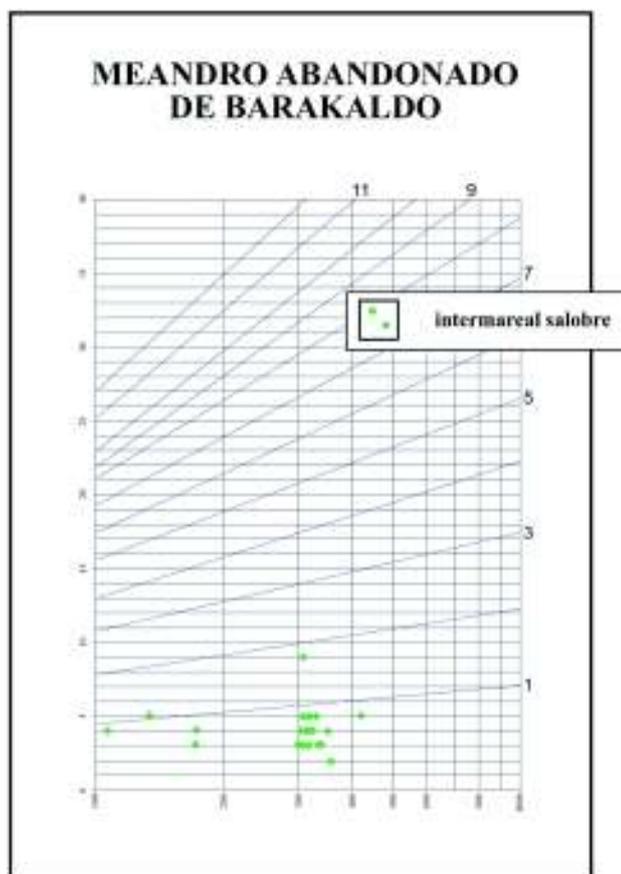


Figura 2-19: Resultados del índice de diversidad específica α de los dos sondeos estudiados (ANS1 y ANS2).

Sondeo ANS2

Según su contenido en foraminíferos, este sondeo puede dividirse en 2 zonas diferentes (Tabla 2-4 y Figura 2-18). En la base, la Asociación de Foraminíferos AF2 está compuesta por 4,3 m de gravas con arena (media 62%, rango 19-95%) y fango, con abundantes fragmentos de bioclastos en la zona basal que pasan a fango arenoso con abundantes fragmentos bioclásticos y materia vegetal hacia techo. Los 0,2 m más inferiores están compuestos por fango arenoso. Presenta una abundancia moderada de caparazones de foraminíferos (media 367 caparazones/100 g, rango 119-1448), las especies dominantes son *A. tepida* (media 84%, rango 62-93%) y *C. excavatum* (media 10%, rango 4-28%) junto con *H. germanica* como especie dominante en la mitad superior (media 11%, rango 5-15%) y como especie secundaria en la mitad inferior (media 3%, rango 2-7%). El número de foraminíferos exóticos es extremadamente bajo (media 0,2%, rango 0,2%), dominan los caparazones hialinos (media 100%) y el número de especies es muy bajo

(media 5, rango 3-9) lo que equivale a un índice α de <1 (Figura 2-19 y Tabla 2-4). A -0,75 m y a -2,60 m se han datado sendas muestras de conchas que ofrecen edades de 46860 ± 1600 y 43380 ± 1000 años convencionales BP respectivamente (Tabla 2-1).

AF1: Comprende los 2,60 m superiores, de los cuales los 60 cm basales son la continuación de los fangos presentes en la AF2 y los 2,0 m superiores están compuestos por arcilla compacta de colores rojizos. En toda esta zona no aparecen caparazones de foraminíferos.

En este sondeo se han tomado 8 muestras para el análisis de su contenido en polen (Figura 2-20). Los resultados obtenidos presentan un elevado porcentaje de polen arbóreo (80-90%). Los componentes dominantes son *Corylus* (27-50%) y *Quercus caducifolia* (12-40%), mientras que los secundarios son *Pinus* (3-21%) y *Ulmus* (0,5-7%). Estos datos indicarían la existencia de un bosque mixto *Quercus-Corylus* con *Ulmus* en los alrededores del meandro de Barakaldo durante el intervalo de tiempo representado (Santos, comunicación personal).

En total se han encontrado 6 especies indígenas y 7 especies exóticas en este sondeo.

2.3.c) Discusión

Muestras superficiales. Al igual que ocurre en el resto de la Ría de Bilbao (Cearreta *et al.*, 2000), las muestras superficiales únicamente presentan muy escasos foraminíferos transportados que indican unas condiciones ambientales extremadamente deterioradas, en las zonas estuarinas actuales (Cearreta *et al.*, 2000).

Identificación de los principales subambientes en los sondeos. Siguiendo el mismo esquema de identificación de subambientes utilizado para el resto de los sondeos analizados en este capítulo, en base a su contenido en foraminíferos estos dos sondeos pueden dividirse en distintos subambientes que han ido evolucionando a lo largo del tiempo (Figura 2-20).

En los dos sondeos analizados, se han identificado 2 Asociaciones de Foraminíferos diferentes. Comenzando por la base, la AF2 en ANS1 (equivalente a la AF2 en ANS2), muestra una tendencia grandecreciente que va desde gravas con arena y fango en la base a fango arenoso a techo donde domina la asociación *A. beccarii* en ANS1 (y la asociación *A. tepida/C. excavatum/H. germanica*



Figura 2-20: Interpretación paleoambiental de los sondeos del meandro abandonado de Barakaldo, basada en las asociaciones de foraminíferos. Las dataciones de radiocarbono y las muestras polínicas también aparecen indicadas. TST: cortejo sedimentario transgresivo; HST: cortejo sedimentario de nivel del mar alto. La profundidad está referida al nivel de mar local. 1-2 Asociaciones de Foraminíferos (AF).

en ANS2). Esta asociación se interpreta como una secuencia de relleno de canal, donde la AF2d y AF2b de ANS1 corresponderían a condiciones submareales y las AF2c y AF2a de ANS1 (y AF2 de ANS2) representarían zonas intermareales. Ambas asociaciones son representativas de ambientes estuarinos salobres (Cearreta, 1998), mientras que el elevado porcentaje de grava y arena gruesa implica una elevada energía relativa.

Las dataciones radiométricas obtenidas en la AF2 del sondeo ANS2 han sido de 43380 ± 1000 y de 46860 ± 1600 años convencionales BP. Estas dataciones se encuentran en el límite de detección del radiocarbono, y además se presentan invertidas (Figura 2-20), mostrando una edad más joven la muestra más profunda. Si se comparan con los resultados obtenidos del análisis palinológico preliminar, se consideran demasiado antiguas y posiblemente no válidas. Según estos resultados polínicos, los materiales tendrían una edad comprendida entre 8000 años BP y más moderna de 6000 años BP al compararlos con

asociaciones polínicas equivalentes obtenidas en otro estuario de este mismo litoral cantábrico (estuario de Bidasoa, Figura 1-3) (Sanchez-Goñi, 1996; Santos, comunicación personal). En consecuencia, es probable que el material datado haya sido resedimentado y sea más antiguo que la secuencia sedimentaria que lo contiene.

La AF2b y AF2a en el sondeo ANS1 presentan en conjunto una nueva sucesión granodecreciente aunque a menor escala, donde la asociación dominante está formada por *A. tepida*/*H. germanica*. Esta asociación podría representar una migración del canal que ha generado los depósitos en el meandro de Barakaldo, dentro de un medio salobre de nivel energético medio (el contenido medio en arena es de 55%, rango 50-72%). Sin embargo, la escasa presencia de caparzones de foraminíferos en las zonas con alto contenido en grava (AF2d y AF2b en ANS1) junto con la proximidad de este sondeo a la ladera del monte Rontegi (Figura 2-17) podría también implicar un posible origen continental, siendo estos materiales derrubios procedentes de la ladera próxima.

La AF1 de ambos sondeos corresponde a arcillas de colores rojizos con una total ausencia de foraminíferos, que se interpreta como un depósito de materiales de origen continental posterior a la colmatación del canal.

Integración de la historia ambiental del meandro de Barakaldo en el contexto general de la Ría de Bilbao. Los sedimentos holocenos presentes en el resto de los sondeos estudiados en la Ría de Bilbao muestran, en general, secuencias granodécimas desde materiales con gravas en la base, sedimentos más arenosos intermedios, hasta materiales más fangosos a techo. Esta misma tendencia puede observarse, a rasgos generales, en las secuencias obtenidas en el meandro de Barakaldo. Sin embargo, las Asociaciones de Foraminíferos presentes *A. tepida/H. germanica/C. excavatum* y el reducido número de especies, indican un medio salobre restringido más parecido a la cabecera que a la situación paleoambiental deducida en el tramo medio de la ría. Además, los espesores de las secuencias sedimentarias obtenidas en el meandro son muy reducidos, en comparación con los obtenidos en los sondeos de la zona media del estuario (Figuras 2-20 y 2-14), debido a la pequeña excavación producida en esta zona por el río pleistoceno y que probablemente está relacionada con el temprano abandono fluvial del meandro (máximo -3 m por debajo del nlm). Todo esto, unido al hecho de que las dataciones radiométricas obtenidas probablemente corresponden a material resedimentado y que según el análisis polínico efectuado se trataría, en realidad, de materiales de edad holocena, parece indicar que los materiales estudiados corresponden al relleno de un canal intermareal salobre restringido, con muy poca influencia directa del mar abierto. Estos sedimentos podrían corresponder a la parte alta del Cortejo Sedimentario Transgresivo (TST) y al Cortejo Sedimentario de Nivel del Mar Alto (HST) (Figura 2-20), que al igual que ocurre en la cabecera de la ría no pueden ser diferenciados entre sí a través del análisis micropaleontológico debido a la ausencia casi total de elementos exóticos de origen marino.

2.4. Conclusiones

En este capítulo se han analizado las asociaciones de foraminíferos contenidas en las sucesiones sedimentarias de nueve sondeos perforados en el eje principal de la Ría de Bilbao y dos en el meandro abandonado de Barakaldo. La interpre-

tación paleoambiental de estas asociaciones encontradas y de otras estudiadas previamente en esta misma ría define el relleno sedimentario de este estuario como una secuencia deposicional eustática de cuarto orden en el sentido definido por Vail *et al.* (1991). Esta secuencia sedimentaria comprende un amplio rango de Asociaciones de Foraminíferos (AF), que se organizan en tres cortejos sedimentarios, tal y como definen Allen y Posamentier (1993). Cada cortejo sedimentario está compuesto, a su vez, por diferentes conjuntos de Asociaciones de Foraminíferos separados por superficies estratigráficas continuas, que constituyen unos buenos marcadores para la correlación.

La Figura 2-15 muestra esquemáticamente la estructura del complejo relleno sedimentario del eje principal de la Ría de Bilbao. Las gravas y arenas de grano grueso de origen fluvial con ausencia casi total de foraminíferos representan unas condiciones de nivel de mar bajo durante la época Tardiglacial (cortejo de nivel del mar bajo-LST). Durante la transgresión marina (8500-3000 años cal BP), estos depósitos de grano grueso quedaron atrapados en las zonas media y superior del estuario por la migración de los depósitos estuarinos hacia tierra. Sin embargo, en la zona inferior del estuario los materiales que formaban el LST fueron retrabajados e incluidos dentro del siguiente cortejo transgresivo (TST). Se depositaron grandes volúmenes de sedimento durante el TST. En el estuario inferior estos materiales muestran principalmente un carácter marino-proximal, mientras que en la zona media los sedimentos presentan intercalaciones entre materiales salobres y marino-proximales, y en la zona superior del estuario y en el meandro de Barakaldo sólo se depositaron materiales salobres. La parte final del TST está representada por sedimentos marinos (con predominio de foraminíferos exóticos) entre las superficies de *ravinement* (TRS) por debajo, y la superficie de máxima inundación (MFS) por encima. El siguiente cortejo sedimentario de nivel de mar alto (HST) depositado durante el Holoceno superior (desde 3000 años cal BP hasta la ocupación humana del siglo XIX) se caracteriza por unas condiciones intermareales y supramareales salobres correspondientes a un relleno posterior a la estabilización del nivel marino. Este esquema evolutivo general se integra bien con los resultados obtenidos en otras secuencias sedimentarias costeras estudiadas en el Golfo de Bizkaia.

Muestra	Código de publicación	Prof. (m)	Material	Método	Edad C-14 convencional BP	C-13/C-12 ratio (‰)	Edad calibrada BP*	2 σ cal BP*
SR6-10	Beta-127950	-3,0	concha	AMS	2060±40	-1,40	1220	1315-1125
SR6-17	Beta-127951	-8,0	madera	AMS	7600±50	-27,80	8390	8440-8345
SR12-9	Beta-127953	-3,5	concha	standard	4860±60	0,00	4815	4905-4565
SR12-10	Beta-127952	-4,5	concha	standard	4900±120	0,00	4860	5110-4450
SM13-7	Beta-127945	-2,4	concha	standard	2000±60	0,00	1145	1300-1010
SM13-18	Beta-127944	-7,9	concha	standard	2440±60	0,00	1685	1875-1525
SM13-53	Beta-127943	-25,4	concha	standard	8420±90	0,00	8520	8610-8365
SM11-16	Beta-127946	-4,8	concha	standard	4430±90	0,00	4170	4425-3970
SM11-18	Beta-127947	-5,8	concha	AMS	2830±40	-2,30	2225	2310-2045
SM1-10	Beta-127942	-2,0	concha	AMS	3540±40	1,20	3020	3105-2940
SM1-14	Beta-127941	-4,0	concha	standard	3970±80	0,00	3560	3775-3350
SM1-19	Beta-127940	-6,5	concha	standard	6140±90	0,00	6165	6355-5980
SM1-29	Beta-127939	-11,2	concha	standard	7830±90	0,00	7910	8035-7710
SM1-31	Beta-127938	-11,8	concha	AMS	7920±40	-0,30	7970	8020-7920
S19-5	Beta-127937	1,0	concha	AMS	1010±40	-2,10	205	250-125
S19-18	Beta-127936	-5,9	concha	standard	5150±80	0,00	5140	5250-4910
S13-12	Beta-127934	-5,7	concha	standard	2590±70	0,00	1895	2000-1695
S13-13	Beta-127935	-6,1	concha	AMS	2620±40	0,10	1910	1950-1800
S5-19	Beta-127933	-4,1	concha	standard	3350±60	0,00	2810	2950-2640
SC22C-8	Beta-127955	-6,5	concha	standard	7460±80	0,00	7525	7650-7345
SC22C-12	Beta-127954	-9,0	concha	AMS	7930±40	-6,20	7975	8035-7925
ANS2-13	Beta-127949	-0,7	concha	AMS	46860±1600*	-5,4		
ANS2-19	Beta-127948	-2,6	concha	AMS	43380±1000*	-3,4		

* Efecto reservorio corregido

Tabla 2-1: Dataciones de radiocarbono.

SR12	SR6	SM13	SM11	SM1
AF 1: 24 (24-29) especies 34 (31-40) % exóticos 3075 caparazones/100 g $\alpha < 7$ <i>H. germanica</i> 37 (34-40) % <i>C. lobatulus</i> 17 (13-21) % <i>A. tepida</i> 13 (11-13) % <i>C. williamsoni</i> 9 (8-11) %	AF 1: 24 (23-26) especies 29 (24-35) % exóticos 1962 caparazones/100 g $\alpha > 3$ <i>H. germanica</i> 32 (31-34) % <i>C. williamsoni</i> 17 (12-23) % <i>C. lobatulus</i> 17 (17-18) % <i>A. tepida</i> 15 (14-16) % <i>B. britannica</i> 4 (1-6) %	AF 1: 15 (10-20) especies 16 (4-23) % exóticos 1662 caparazones/100 g $\alpha > 3$ <i>A. tepida</i> 40 (23-61) % <i>H. germanica</i> 39 (17-52) % <i>C. oceanensis</i> 4 (2-5) % <i>C. lobatulus</i> 2 (0-10) %	AF 1: 18 (15-20) especies 11 (5-25) % exóticos 1336 caparazones/100 g $\alpha < 4$ <i>A. tepida</i> 41 (32-51) % <i>H. germanica</i> 39 (26-52) % <i>C. williamsoni</i> 4 (1-6) % <i>C. lobatulus</i> 4 (0-12) % <i>C. oceanensis</i> 2 (1-4) %	AF 1: 25 (23-26) especies 52 (39-75) % exóticos 674 caparazones/100 g $\alpha > 5$ <i>C. lobatulus</i> 29 (12-40) % <i>A. tepida</i> 26 (15-35) % <i>H. germanica</i> 13 (7-17) % <i>R. irregularis</i> 7 (2-18) % <i>C. williamsoni</i> 3 (1-7) % <i>C. oceanensis</i> 2 (0-4) %
AF 2: 24 (21-29) especies 55 (27-77) % exóticos 1145 caparazones/100 g $\alpha < 6$ <i>C. lobatulus</i> 42 (32-51) % <i>H. germanica</i> 19 (4-44) % <i>A. tepida</i> 17 (11-23) % <i>R. anomala</i> 3 (1-4) %	AF 2: 23 (21-25) especies 62 (50-74) % exóticos 2146 caparazones/100 g $\alpha 5,5$ <i>C. lobatulus</i> 39 (27-51) % <i>A. tepida</i> 17 (12-30) % <i>H. germanica</i> 15 (11-17) % <i>R. anomala</i> 6 (5-8) % <i>R. irregularis</i> 5 (1-14) %	AF 2: Pocos caparazones 16 caparazones/100 g	AF 2: Pocos caparazones 5 caparazones/100 g	AF 2: Pocos caparazones
AF 3: 13 (13) especies 4 (4) % exóticos 128 caparazones/100 g $\alpha > 2,5$ <i>C. oceanensis</i> 46 (46) % <i>A. tepida</i> 24 (24) % <i>H. germanica</i> 23 (23) % <i>C. lobatulus</i> 2 (2) %	AF 3: 15 (7-22) especies 13 (9-26) % exóticos 2990 caparazones/100 g $\alpha > 3$ <i>H. germanica</i> 32 (16-52) % <i>A. tepida</i> 31 (14-49) % <i>C. oceanensis</i> 16 (1-40) % <i>B. pseudoplicata</i> 3 (0-6) % <i>R. irregularis</i> 3 (0-14) % <i>C. lobatulus</i> 2 (0-8) %	AF 3: 26 (15-34) especies 53 (19-89) % exóticos 4064 caparazones/100 g $\alpha 6$ <i>R. irregularis</i> 20 (0-47) % <i>A. tepida</i> 20 (7-39) % <i>C. lobatulus</i> 15 (9-55) % <i>H. germanica</i> 15 (2-27) % <i>C. oceanensis</i> 5 (0.5-1.1) % <i>C. williamsoni</i> 2 (0-5) % <i>M. subrotunda</i> 2 (0-7) %	AF 3: 20 (10-27) especies 58 (7-69) % exóticos 453 caparazones/100 g $\alpha > 5$ <i>C. lobatulus</i> 42 (3-52) % <i>A. tepida</i> 18 (10-56) % <i>H. germanica</i> 17 (12-24) % <i>M. secans</i> 5 (0-10) % <i>R. anomala</i> 3 (0-6) % <i>C. williamsoni</i> 3 (0-4) %	AF 3: 24 (14-33) especies 75 (55-87) % exóticos 1060 caparazones/100 g $\alpha > 6$ <i>C. lobatulus</i> 33 (11-51) % <i>R. irregularis</i> 19 (2-41) % <i>A. tepida</i> 13 (6-25) % <i>H. germanica</i> 6 (2-13) % <i>R. anomala</i> 4 (0-9) %
AF 4: grava y arena Pocos caparazones 5 caparazones/100 g	AF 4: grava y arena Pocos caparazones 11 caparazones/100 g	En la sección superior: <i>R. anomala</i> 4 (1-5) %	En la sección superior: <i>G. rudis</i> 9 (0-16) %	En la sección superior: <i>G. rudis</i> 9 (0-16) %

S19	S13	S5	LAS1
<p>AF 1:</p> <p>19 (5-27) especies</p> <p>26 (1-57) % exóticos</p> <p>1638 caparazones/100 g</p> <p>$\alpha > 4$</p> <p><i>H. germanica</i> 32 (17-53) %</p> <p><i>A. tepida</i> 25 (3-73) %</p> <p><i>C. lobatulus</i> 13 (0-30) %</p> <p><i>C. williamsoni</i> 9 (1-22) %</p>	<p>AF 1:</p> <p>24 (15-31) especies</p> <p>69 (29-81) % exóticos</p> <p>285 caparazones/100 g</p> <p>$\alpha < 6$</p> <p><i>C. lobatulus</i> 47 (16-60) %</p> <p><i>H. germanica</i> 12 (4-30) %</p> <p><i>A. tepida</i> 10 (6-23) %</p> <p><i>R. anomala</i> 4 (2-7) %</p> <p><i>M. secans</i> 3 (0-10) %</p> <p><i>R. irregularis</i> 3 (0-7) %</p> <p><i>T. truncata</i> 2 (0-4) %</p>	<p>AF 1:</p> <p>20 (17-26) especies</p> <p>79 (50-95) % exóticos</p> <p>1591 caparazones/100 g</p> <p>$\alpha > 5$</p> <p><i>C. lobatulus</i> 48 (26-68) %</p> <p><i>A. tepida</i> 8 (1-16) %</p> <p><i>R. anomala</i> 6 (0-20) %</p> <p><i>H. germanica</i> 6 (0-14) %</p> <p><i>M. secans</i> 5 (0-14) %</p> <p><i>T. truncata</i> 3 (0-6) %</p>	<p>AF 1:</p> <p>23 (17-26) especies</p> <p>76 (67-94) % exóticos</p> <p>139 caparazones/100 g</p> <p>$\alpha > 5,5$</p> <p><i>C. lobatulus</i> 50 (42-61) %</p> <p><i>A. tepida</i> 11 (6-17) %</p> <p><i>R. anomala</i> 5 (3-11) %</p> <p><i>H. germanica</i> 5 (0-13) %</p> <p><i>M. secans</i> 3 (0-8) %</p> <p><i>Q. seminula</i> 3 (0-7) %</p> <p><i>Q. lata</i> 3 (0-7) %</p> <p><i>C. williamsoni</i> 2 (0-8) %</p> <p><i>T. truncata</i> 2 (1-5) %</p> <p><i>G. rudis</i> 2 (0-6) %</p>
<p>AF 2:</p> <p>28 (22-34) especies</p> <p>64 (49-85) % exóticos</p> <p>1693 caparazones/100 g</p> <p>$\alpha < 7$</p> <p><i>C. lobatulus</i> 33 (20-50) %</p> <p><i>H. germanica</i> 14 (6-20) %</p> <p><i>A. tepida</i> 13 (6-26) %</p> <p><i>R. irregularis</i> 9 (4-16) %</p> <p><i>R. anomala</i> 5 (1-11) %</p>	<p>AF 2:</p> <p>16 (13-23) especies</p> <p>23 (6-64) % exóticos</p> <p>124 caparazones/100 g</p> <p>$\alpha < 4$</p> <p><i>A. tepida</i> 36 (13-56) %</p> <p><i>H. germanica</i> 25 (13-34) %</p> <p><i>C. lobatulus</i> 13 (3-39) %</p> <p><i>C. oceanensis</i> 6 (1-8) %</p> <p><i>C. williamsoni</i> 5 (2-9) %</p> <p><i>R. irregularis</i> 4 (0-9) %</p>	<p>AF 2:</p> <p>27 (22-37) especies</p> <p>70 (50-85) % exóticos</p> <p>1271 caparazones/100 g</p> <p>$\alpha < 7$</p> <p><i>R. irregularis</i> 32 (15-46) %</p> <p><i>C. lobatulus</i> 17 (3-40) %</p> <p><i>A. tepida</i> 10 (3-37) %</p> <p><i>H. germanica</i> 10 (4-18) %</p> <p><i>R. anomala</i> 3 (0-15) %</p> <p><i>C. oceanensis</i> 3 (0-10) %</p> <p><i>M. subrotunda</i> 2 (0-6) %</p>	<p>AF 2:</p> <p>24 (15-29) especies</p> <p>89 (83-96) % exóticos</p> <p>34 caparazones/100 g</p> <p>$\alpha < 5$</p> <p><i>C. lobatulus</i> 61 (53-76) %</p> <p><i>R. anomala</i> 4 (0-11) %</p> <p><i>R. irregularis</i> 4 (0-9) %</p> <p><i>A. tepida</i> 4 (0-6) %</p> <p><i>E. crispum</i> 3 (0-6) %</p> <p><i>G. rudis</i> 3 (0-6) %</p>
<p>AF 3:</p> <p>23 (21-26) especies</p> <p>36 (33-40) % exóticos</p> <p>231 caparazones/100 g</p> <p>$\alpha > 4$</p> <p><i>A. tepida</i> 34 (31-37) %</p> <p><i>H. germanica</i> 22 (20-24) %</p> <p><i>C. lobatulus</i> 20 (18-23) %</p> <p><i>R. irregularis</i> 4 (3-5) %</p> <p><i>C. oceanensis</i> 3 (2-5) %</p> <p><i>R. anomala</i> 3 (2-3) %</p>			

Tabla 2-2: Resumen de los resultados microfaunísticos. El valor individual representa la media, los valores entre paréntesis indican el rango.

SR12	SR6	SM13	SM11	SM1
<p>AF 1: Profundidad: -0,1/2,9 m Espesor: 2,8 m Litología: arena fangosa con bioclastos % arena: 76 (66-89)</p> <p>AF 2: Profundidad: -5,1/-0,1 m Espesor: 5 m Litología: arena fangosa con bioclastos y restos de plantas % arena: 86 (83-90)</p> <p>AF 3: Profundidad: -5,8/-5,1 m Espesor: 0,7 m Litología: arena fangosa con restos de plantas % arena: 59 (59)</p> <p>AF 4: Profundidad: -21,4/-5,8 m Espesor: 15,6 m Litología: arena, gravas redondeadas y arcilla amarilla</p>	<p>AF 1: Profundidad: +2,2/+3,4 m Espesor: 1,2 m Litología: arena fangosa con bioclastos % arena: 37 (18-55)</p> <p>AF 2: Profundidad: -3,6/+2,2 m Espesor: 5,8 m Litología: arena con bioclastos y restos de plantas % arena: 95 (88-97)</p> <p>AF 3: Profundidad: -15,7/-3,6 m Espesor: 12,1 m Litología: fango arenoso con restos de plantas y bioclastos % arena: 41 (3-74)</p> <p>Dataciones: 8390 años cal BP (-8,0 m)</p> <p>AF 4: Profundidad: -18,6/-15,7 m Espesor: 2,9 m Litología: arena, gravas redondeadas y arcilla amarilla</p>	<p>AF 1: Profundidad: -2,7/+0,5 m Espesor: 3,2 m Litología: arena con fango y grava % arena: 63 (52-85)</p> <p>AF 2: Profundidad: -5,2/-2,7 m Espesor: 2,5 m Litología: arena con gravas y material bioclástico % arena: 82 (72-86)</p> <p>AF 3: Profundidad: -32/-5,2 m Espesor: 26,8 m Litología: arena con restos de plantas y bioclastos, el mineral presenta gravas % arena: 75 (35-92)</p> <p>Dataciones: 8520 años cal BP (-25,4 m) 1685 años cal BP (-7,9 m)</p>	<p>AF 1: Profundidad: -1,5/+1,1 m Espesor: 2,6 m Litología: arena fangosa con restos de plantas % arena: 58 (45-81)</p> <p>AF 2: Profundidad: -1,8/-1,5 m Espesor: 0,3 m Litología: grava arenosa ligeramente cementada % arena: 44 (44)</p> <p>AF 3: Profundidad: -6,5/-1,8 m Espesor: 4,7 m Litología: arena fangosa con restos de plantas y bioclastos, los 0,7 m inferiores presentan gravas redondeadas % arena: 75 (57-89)</p> <p>Dataciones: 2225 años cal BP (-5,8 m) 4170 años cal BP (-4,8 m)</p>	<p>AF 1: Profundidad: -0,6/+1,9 m Espesor: 2,5 m Litología: fango arenoso con bioclastos y algunos restos de plantas % arena: 49 (22-78)</p> <p>AF 2: Profundidad: -2,3/-0,6 m Espesor: 1,7 m Litología: grava arenosa con bioclastos ligeramente cementada % arena: 51 (43-64)</p> <p>AF 3: Profundidad: -12,8/-2,3 m Espesor: 10,5 m Litología: arena fangosa con bioclastos, los 6,5 m inferiores presentan arena con grava y bioclastos % arena: 64 (19-86)</p> <p>Dataciones: 7970 años cal BP (-11,8 m) 7910 años cal BP (-11,2 m) 6165 años cal BP (-6,5 m) 3560 años cal BP (-4,0 m)</p>

S19	S13	S5	LAS1
<p>AF 1: Profundidad: +0,7/+4,5 m Espesor: 3,8 m Litología: arena fangosa con bioclastos % arena: 73 (50-87) Dataciones: 205 años cal BP (+1,0 m)</p>	<p>AF 1: Profundidad: -7,5/-0,8 m Espesor: 6,7 m Litología: fango arenoso con restos de plantas % arena: 77 (40-96) Dataciones: 1910 años cal BP (-6,1 m) 1895 años cal BP (-5,7 m)</p>	<p>AF 1: Profundidad: -5,4/+4,8 m Espesor: 10,3 m Litología: arena fangosa con bioclastos, gasterópodos terrestres y restos de plantas % arena: 76 (42-96) Dataciones: 2810 años cal BP (-4,1 m)</p>	<p>AF 1: Profundidad: -2,5/+9,7 m Espesor: 12,2 m Litología: arena rojiza con gasterópodos terrestres y restos de plantas % arena: 86 (57-96)</p>
<p>AF 2: Profundidad: -4,7/+0,7 m Espesor: 5,4 m Litología: arena gris con restos de plantas % arena: 84 (61-90)</p>	<p>AF 2: Profundidad: -9,8/-7,5 m Espesor: 2,3 m Litología: fango con gravas y arenas rojizas % arena: 48 (39-56)</p>	<p>AF 2: Profundidad: -20,6/-5,4 m Espesor: 15,2 m Litología: arena con fango, gravas y restos de plantas % arena: 63 (18-94)</p>	<p>AF 2: Profundidad: -12,8/-2,5 m Espesor: 10,3 m Litología: arena rojiza con bioclastos y restos de plantas % arena: 97 (87-98)</p>
<p>AF 3: Profundidad: -6,0/-4,7 m Espesor: 1,3 m Litología: arena gris con bioclastos extremadamente abundantes % arena: 60 (56-63)</p>			

Tabla 2-3: Resumen de los resultados sedimentológicos. El valor individual representa la media, los valores entre paréntesis indican el rango.

ANS2

Profundidad: +3,90/+1,30
 Espesor: 2,60 m
 Litología: Arcilla compacta rojiza y fangos
 % arena: 44 (15-78)

Profundidad: +1,30/-3,0 m
 Espesor: 4,3 m
 Litología: gravas con arena y fango
 % arena: 62 (19-95)
 Dataciones:
 47260±1600 años convencionales BP (-0,7 m)
 43780±1000 años convencionales BP (-2,6 m)

AF 1:
 Azoico

AF 2:
 4 (3-9) especies
 0,2 (0-2) % exóticos
 1145 caparazones/100 gr
 $\alpha < 1$
A. tepida 84 (62-93) %
C. excavatum 10 (4-28) %
H. germanica 11 (5-15) %

Profundidad: +1,79/+1,49 m
 Espesor: 0,3 m
 Litología: Arena gruesa y fango
 % arena: 51 (50-52)

Profundidad: +1,49/+0,34 m
 Espesor: 1,15 m
 Litología: arena fango con fragmentos de bioclastos
 % arena: 24 (18-32)

Profundidad: +0,34/-2,01 m
 Espesor: 2,35 m
 Litología: gravas con arena, fango y fragmentos de bioclastos
 % arena: 15 (10-21)

ANS1

Profundidad: +3,29/+2,09 m
 Espesor: 1,20 m
 Litología: Arcilla compacta rojiza
 % arena: 78 (71-83)

Profundidad: +2,09/+1,79 m
 Espesor: 0,3 m
 Litología: arena y fango con restos de materia vegetal
 % arena: 60 (52-70)

AF 1:
 Azoico

AF 2a:
 2 (2-3) especies
 0,2 (0,2) % exóticos
 1334 caparazones/100 g
 $\alpha < 1$
A. tepida 88 (82-93) %
H. germanica 13 (7-18) %

AF 2b:
 4 especies
 0 % exóticos
 69 caparazones/100 g
A. tepida

AF 2c:
 4 (3-5) especies
 0,1 (0,1) % exóticos
 294 caparazones/100 g
 $\alpha < 1$
A. tepida 95 (94-96) %
H. germanica 4 (3-6) %

AF 2d:
 4 (3-6) especies
 0 % exóticos
 100 caparazones/100 g
 $\alpha < 1$
A. tepida 96 (96) %

Tabla 2-4: Resumen de los resultados microfauísticos y sedimentológicos de los sondeos del meandro abandonado de Barakaldo. El valor individual representa la media, los valores entre paréntesis indican el rango.

APENDICE 2-A: Relación sistemática de especies de foraminíferos bentónicos identificadas en los materiales holocenos de la Ría de Bilbao

1. CAPARAZÓN AGLUTINANTE

Arenoparrella mexicana (Kornfeld) = *Trochammina inflata* (Montagu) var. *mexicana* Kornfeld, 1931

Eggerelloides scaber (Williamson) = *Bulimina scabra* Williamson, 1858

Gaudryina rudis Wright, 1900

Jadammina macrescens (Brady) = *Trochammina inflata* (Montagu) var. *macrescens* Brady, 1870

Textularia bocki Höglund, 1947

Textularia earlandi Parker, 1952

Textularia saggittula DeFrance, 1824

Textularia sp.

Textularia truncata Höglund, 1947

Trochammina inflata (Montagu) = *Nautilus inflatus* Montagu, 1808

2. CAPARAZÓN PORCELANÁCEO

Adelosina cliarensis (Heron-Allen and Earland) = *Miliolina cliarensis* Heron-Allen and Earland, 1930

Adelosina laevigata d'Orbigny, 1826

Adelosina sp.

Adelosina striata d'Orbigny, 1826

Cornuspira involvens (Reuss) = *Operculina involvens* Reuss, 1850

Massilina secans (d'Orbigny) = *Quinqueloculina secans* d'Orbigny, 1826

Miliolinella striata (Montagu) = *Vermiculum striatum* Montagu, 1803

Miliolinella subrotunda (Montagu) = *Vermiculum subrotundum* Montagu, 1803

Pateoris hauerinoides (Rhumbler) = *Quinqueloculina subrotunda* (Montagu) var. *hauerinoides* Rhumbler, 1936

Pyrgo depressa (d'Orbigny) = *Biloculina depressa* d'Orbigny, 1826

Quinqueloculina auberiana d'Orbigny, 1839

Quinqueloculina berthelotiana d'Orbigny, 1839

Quinqueloculina bicornis (Walker and Jacob) = *Serpula bicornis* Walker and Jacob, 1798

Quinqueloculina costata d'Orbigny, 1826

Quinqueloculina dimidiata Terquem, 1876

Quinqueloculina irregularis d'Orbigny, 1826

Quinqueloculina laevigata d'Orbigny, 1839

Quinqueloculina lata Terquem, 1876

Quinqueloculina mediterraneensis Le Calvez and Le Calvez, 1958

Quinqueloculina oblonga (Montagu) = *Vermiculum oblongum* Montagu, 1803

Quinqueloculina quadrata Nörvang, 1945

Quinqueloculina rugosa d'Orbigny, 1852

Quinqueloculina seminula (Linné) = *Serpula seminulum* Linné, 1758

Quinqueloculina sp.

Quinqueloculina undulata d'Orbigny, 1826

Quinqueloculina vulgaris d'Orbigny, 1826

Spiroloculina depressa d'Orbigny, 1826

Spiroloculina excavata d'Orbigny, 1846

Spiroloculina nitida d'Orbigny, 1826

Spirorutilis wrightii (Silvestri) = *Spiroplecta wrightii* Silvestri, 1903

Triloculina bermudezi Acosta, 1940

Triloculina trigonula (Lamarck) = *Miliolites trigonula* Lamarck, 1804

3. CAPARAZÓN HIALINO

Acervulina inhaerens Schultze, 1854

Acervulina sp.

Ammonia tepida (Linné) = *Rotalina tepida* (Cushman) var. *tepida* Cushman, 1927

Amphicoryna scalaris (Batsch) = *Nautilus (Orthoceras) scalaris* Batsch, 1791

Astacolus crepidulus (Fichtel and Moll) = *Nautilus crepidula* Fichtel and Moll, 1978

Asterigerinata mamilla (Williamson) = *Rotalina mamilla* Williamson, 1858

Aubignyna hamblensis Murray, Whittaker and Alve, 2000

Bolivina pseudoplicata Heron-Allen and Earland, 1930

Bolivinellina pseudopunctata (Höglund) = *Bolivina pseudopunctata* Höglund, 1947

Brizalina britannica (Macfadyen) = *Bolivina britannica* Macfadyen, 1942

Brizalina difformis (Williamson) = *Textularia variabilis* Williamson var. *difformis* Williamson, 1858

Brizalina spathulata (Williamson) = *Textularia variabilis* Williamson var. *spathulata* Williamson, 1858

Brizalina variabilis (Williamson) = *Textularia variabilis* Williamson var. *typica* Williamson, 1958

- Bulimina alazanensis* Cushman, 1927
Bulimina elongata d'Orbigny, 1846
Bulimina gibba Fornasini, 1902
Bulimina marginata d'Orbigny, 1826
Buliminella elegantissima (d'Orbigny) = *Bulimina elegantissima* d'Orbigny, 1839
Cancris auricula (Fichtel and Moll) = *Nautilus auricula* Fichtel and Moll, 1798
Cancris oblongus (Williamson) = *Rotalia oblonga* Williamson, 1858
Cassidulina carinata (Silvestri) = *Cassidulina laevigata* d'Orbigny var. *carinata* Silvestri, 1896
Cassidulina crassa d'Orbigny, 1839
Cassidulina obtusa Williamson, 1858
Cibicides lobatulus (Walker and Jacob) = *Nautilus lobatulus* Walker and Jacob, 1798
Cibicides sp.
Criboelphidium excavatum (Terquem) = *Polystomella excavata* Terquem, 1875
Criboelphidium gerthi (Van Voorthuysen) = *Elphidium gerthi* Van Voorthuysen 1957
Criboelphidium incertum (Williamson) = *Polystomella umbilicatula* var. *incerta* Williamson, 1858
Criboelphidium oceanensis (d'Orbigny) = *Polystomella oceanensis* d'Orbigny, 1826
Criboelphidium williamsoni (Haynes) = *Elphidium williamsoni* Haynes, 1973
Elphidium crispum (Linné) = *Nautilus crispus* Linné, 1758
Elphidium earlandi Cushman, 1936
Elphidium macellum (Fichtel and Moll) = *Nautilus macellum* Fichtel and Moll, 1798
Elphidium magellanicum Heron-Allen and Earland, 1932
Elphidium margaritaceum (Cushman) = *Elphidium advenum* (Cushman) var. *margaritaceum* Cushman, 1930
Elphidium sp.
Fissurina lucida (Williamson) = *Entosolenia marginata* (Montagu) var. *lucida* Williamson, 1848
Fissurina marginata (Montagu) = *Vermiculum marginatum* Montagu, 1803
Fissurina orbygniana Seguenza, 1862
Florilus pauperatus (Balkwill and Wright) = *Nonionina pauperata* Balkwill and Wright, 1885
Fursenkoina fusiformis (Williamson) = *Bulimina pupoides* d'Orbigny var. *fusiformis* Williamson, 1858
Gavelinopsis praegeri (Heron-Allen and Earland) = *Discorbina praegeri* Heron-Allen and Earland, 1913
Glabratella millettii (Wright) = *Discorbina millettii* Wright, 1911
Globulina gibba (d'Orbigny) = *Polymorphina (Globulina) gibba* d'Orbigny, 1826
Haynesina depressula (Walker and Jacob) = *Nautilus depressulus* Walker and Jacob, 1798
Haynesina germanica (Ehrenberg) = *Nonionina germanica* Ehrenberg, 1840
Hyalinea balthica (Schröter) = *Nautilus balthicus* Schröter, 1783
Lagena clavata (d'Orbigny) = *Oolina clavata* d'Orbigny, 1846
Lagena laevis (Montagu) = *Vermiculum laeve* Montagu, 1803
Lagena perlucida (Montagu) = *Vermiculum perlucidum* Montagu, 1803
Lagena semistriata (Williamson) = *Lagena striata* (Walker) var. β , *semistriata* Williamson, 1848
Lagena sp.
Lagena striata (d'Orbigny) = *Oolina striata* d'Orbigny, 1839
Lagena sulcata (Walker and Jacob) = *Serpula sulcata* Walker and Jacob, 1798
Lamarckina haliotidea (Heron-Allen and Earland) = *Pulvinulina haliotidea* Heron-Allen and Earland, 1911
Laryngosyigma lactea (Walker and Jacob) = *Serpula lactea* Walker and Jacob, 1798
Lenticulina gibba (d'Orbigny) = *Cristellaria gibba* d'Orbigny, 1826
Lenticulina sp.
Nonionella turgida (Williamson) = *Rotalina turgida* Williamson, 1858
Oolina hexagona (Williamson) = *Entosolenia squamora* (Montagu) var. *hexagona* Williamson, 1848
Oolina melo d'Orbigny, 1839
Oolina squamosa (Montagu) = *Vermiculum squamosa* Montagu, 1803
Patellina corrugata Williamson, 1858
Planorbulina mediterraneanensis d'Orbigny, 1826
Rosalina anomala Terquem, 1875
Rosalina globularis d'Orbigny, 1826
Rosalina irregularis (Rhumbler) = *Discorbina irregularis* Rhumbler, 1906
Spirillina vivipara Ehrenberg, 1843
Svratkina sp.
Trifarina angulosa (Williamson) = *Uvigerina angulosa* Williamson, 1958
Trifarina bradyi Cushman, 1923
Uvigerina peregrina Cushman, 1923

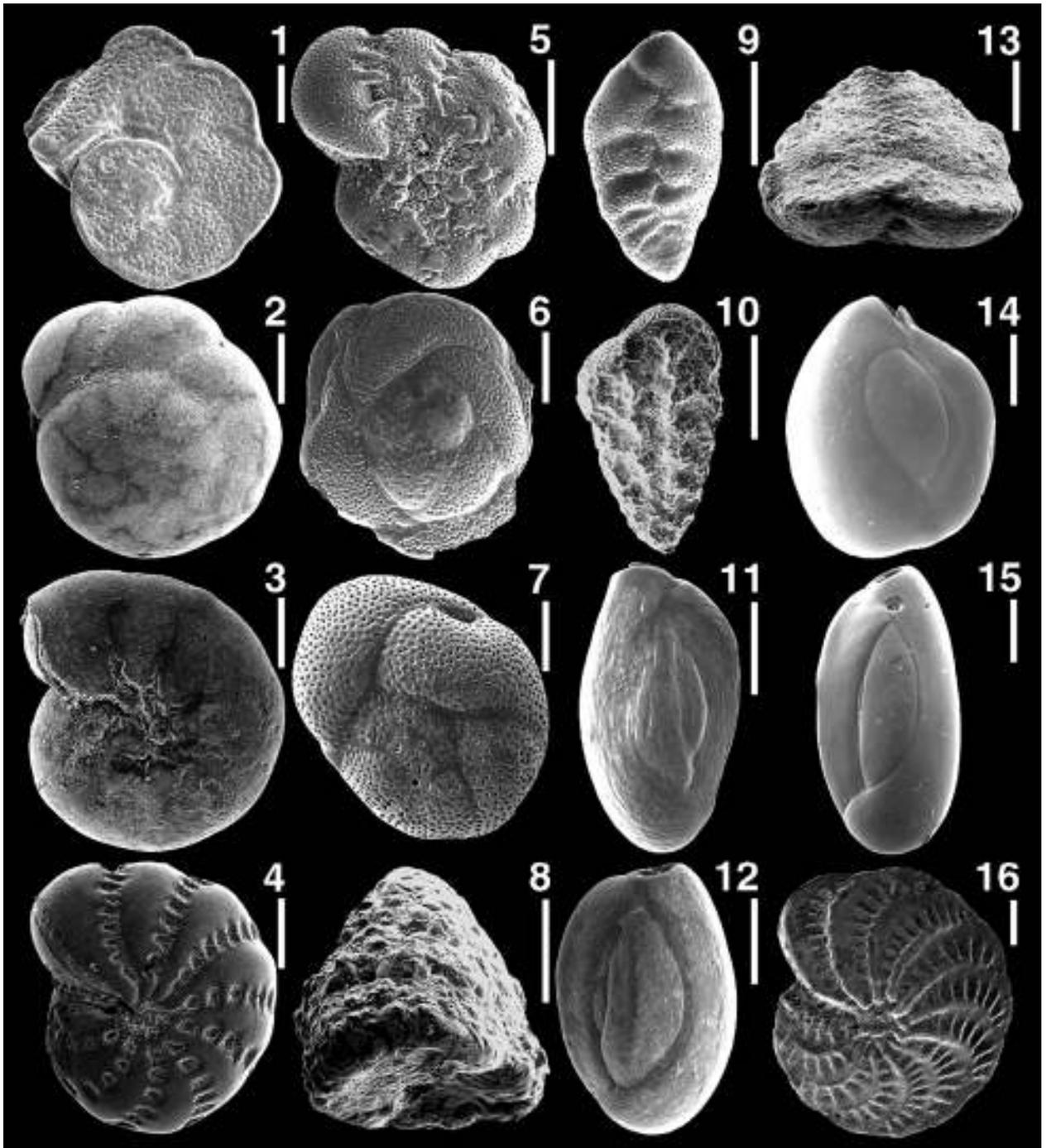


Lámina 2-1: Especies dominantes de foraminíferos bentónicos encontradas en los sondeos holocenos perforados en la Ría de Bilbao. La barra de escala indica 0,1 mm.

- | | |
|--|---|
| 1 - <i>Cibicides lobatulus</i> (Walker and Jacob, 1798), sondeo S19-AF 2 | 9 - <i>Brizalina britannica</i> (Macfadyen, 1942), sondeo SR6-AF 4 |
| 2 - <i>Ammonia tepida</i> (Linné, 1758), sondeo S13-AF 2 | 10 - <i>Bolivina pseudoplicata</i> Heron-Allen and Earland, 1930, sondeo SR6-AF 4 |
| 3 - <i>Haynesina germanica</i> (Ehrenberg, 1840), sondeo S5-AF 2 | 11 - <i>Massilina secans</i> (d'Orbigny, 1826), sondeo LAS1-AF 1 |
| 4 - <i>Criboelphidium williamsoni</i> Haynes, 1973, sondeo SR12-AF 3 | 12 - <i>Quinqueloculina lata</i> Terquem, 1876, sondeo S5-AF 1 |
| 5 - <i>Criboelphidium oceanensis</i> (d'Orbigny, 1826), sondeo SM13-AF 1 | 13 - <i>Textularia truncata</i> Höglund, 1947, sondeo LAS1-AF 2 |
| 6 - <i>Rosalina irregularis</i> (Rhumbler, 1906), sondeo SM13-AF 2 | 14 - <i>Miliolinella subrotunda</i> (Montagu, 1803), sondeo SM11-AF 2 |
| 7 - <i>Rosalina anomala</i> Terquem, 1875, sondeo S5-AF 2 | 15 - <i>Quinqueloculina seminulum</i> (Linné, 1758), sondeo SR12-AF 3 |
| 8 - <i>Gaudryina rudis</i> Wright, 1900, sondeo LAS1-AF 1 | 16 - <i>Elphidium crispum</i> (Linné, 1758), sondeo S19-AF 2 |



3. Etapa industrial (Siglo XIX-XX)



A partir de la segunda mitad del s. XIX, el desarrollo industrial fue alterando intensamente las características naturales de la ría. La imagen corresponde a Sestao a principios del s. XX.

3.1. Introducción

La contaminación de los medios litorales (por ejemplo, la Ría de Bilbao) se ha convertido en un serio problema en muchas partes del mundo (Nriagu y Pacyna, 1988). Los metales pesados y los contaminantes orgánicos que se han vertido a la ría sin ningún tipo de control (ver Capítulo 1) han sido captados por los sedimentos, especialmente por los materiales más finos. La acumulación de sedimentos contaminados puede provocar que estos contaminantes queden atrapados durante largos periodos de tiempo en los estuarios o en las bahías. Sin embargo, un cambio en las condiciones del medio (efecto de la diagénesis temprana, dragados, etc.) puede provocar su liberación al medio, incluso después de haber implementado procedimientos de limpieza y de haber limitado los vertidos (Beno y Gibbs, 1990), provocando un impacto ambiental significativo.

El registro de los cambios ambientales suele preservarse en los sedimentos de las marismas y de las llanuras fangosas inter- y submareales. El análisis de los restos de microfauna en estos sedimentos permite llevar a cabo una evaluación del impacto histórico de los contaminantes en los ecosistemas estuarinos. La acumulación de estos contaminantes puede crear un impacto dramático en la supervivencia de los organismos acuáticos, modificando las características ecológicas del área afectada. Este impacto puede ser registrado como un cambio en la asociación fósil en los testigos sedimentarios. Mientras que la preservación selectiva de los organismos limita enormemente el tipo de cambios que pueden valorarse, las modificaciones inducidas por la contaminación han sido examinadas con éxito utilizando organismos con un buen potencial de preservación, como los foraminíferos (Alve, 1991b; Sharifi *et al.*, 1991). Por otro lado, el estudio geoquímico de los sedimentos ha sido utilizado ampliamente para monitorizar la contaminación acuática (Wilber y Hunter, 1979; Boldrin *et al.*, 1989; Collins *et al.*, 1995; Zhang, 1995) y en reconstrucciones paleoambientales (Thomas y Varekamp, 1991; Daoust *et al.*, 1996), permitiendo realizar una valoración de la escala de los aportes de contaminantes sufridos en el reciente pasado industrial y del desarrollo urbanístico (Valette-Silver, 1993; Croudace y Cundy, 1995; Cundy *et al.*, 1997; Cundy *et al.*, 2003). Estos estudios también pueden permitir evaluar el efecto causado por el posterior depósito de sedimen-

tos no contaminados o de las medidas de recuperación ambiental. El interés de estos análisis geoquímicos radica en que van a caracterizar el medio en el que se encuentran las diferentes asociaciones de foraminíferos.

El objetivo de este capítulo es examinar la historia reciente de la transformación ambiental de la Ría de Bilbao a través de las asociaciones de foraminíferos bentónicos y con el apoyo de los datos geoquímicos. Ambos indicadores han sido obtenidos en los testigos sedimentarios recogidos de las llanuras intermareales.

3.1.a) El área de estudio

La Ría de Bilbao, cuyos rasgos naturales han sido modificados dramáticamente por el reciente desarrollo urbano, industrial y portuario, ha sido reducida a un simple canal mareal que es navegable desde la ciudad hasta el mar abierto (Capítulo 1). El estuario moderno tiene 15 km de longitud, una anchura media de 100 m y el canal tiene una profundidad media de 2 m en la cabecera y de 9 m en la desembocadura del estuario. Está formado por el tramo mareal del río Nervión, aunque cuatro afluentes (Kadagua, Asua, Galindo y Gobelos) descargan dentro de la propia ría (Figuras 3-1 y 3-2). El canal mareal desemboca en una amplia bahía denominada El Abra (anchura media 3,5 km; hasta 30 m de profundidad). La primera industria del hierro y el acero se instaló sobre las marismas de la zona media del estuario en 1854 (García-Merino, 1987). Durante los últimos 150 años, la Ría de Bilbao ha recibido vertidos de muchas fuentes (lavado mineral, desechos industriales y efluentes urbanos) que han degradado considerablemente la calidad ambiental del estuario. Como consecuencia, sus sedimentos tienen concentraciones extremadamente bajas de oxígeno y un contenido elevado en materia orgánica y metales pesados (Irabien, 1992; Sáiz-Salinas *et al.*, 1996). Estos sedimentos contaminados inmovilizados en las áreas intermareales pueden actuar a largo plazo como fuentes de metales pesados al medio acuático y, por lo tanto, podrían continuar teniendo un impacto medioambiental significativo.

3.2. Materiales y Métodos

Los sondeos estudiados, de 6 a 10 metros de longitud, fueron perforados en 6 áreas intermareales a lo largo la ría durante los meses de enero y

febrero del año 2000 (Figura 3-2): Zorroza, Asua, Erandio, Galindo, Simondrogas y Gobelás. Se eligieron estas áreas pensando que eran las menos afectadas por los continuos dragados llevados a cabo para mantener navegable el canal de la ría y, por tanto, donde mejor se podría conservar el registro histórico de la misma. En cualquier caso, debe hacerse notar que es extremadamente difícil encontrar ambientes inalterados en este estuario donde se puedan recuperar sondeos con registro temporal continuo. Por medio de una perforadora de percusión se insertaron varias extensiones de acero (diámetro interior de 3 cm) en cada punto de muestreo, con la intención de alcanzar el horizonte más profundo posible. Los sondeos fueron descritos y fotografiados previamente a la realización del muestreo, en el que se tomaron muestras (3 cm de grosor) aproximadamente cada 25 cm.

Las profundidades están referidas siempre al nivel del mar local (nlm, la bajamar equinoccial en el Puerto de Bilbao, fechada el 27 de septiembre de 1878).

Las muestras tomadas para el análisis de foraminíferos fueron tratadas siguiendo el proceso descrito en el apartado 1.1.c. Observaciones previas de la fracción arena indicaron que los caparazones de los foraminíferos mostraban un buen estado de conservación, no aparecían signos de disolución en las especies de naturaleza carbonatada, y que tampoco se observaban individuos con deformidades de manera frecuente. El residuo pesado obtenido tras la flotación en tricloroetileno fue examinado para evitar la posible pérdida de caparazones que no flotaran. Donde su abundancia lo permitió, se extrajeron caparazones hasta obtener una cantidad representativa superior a 300 individuos. En el resto de los casos se recogieron todos los caparazones presentes en la muestra. Los datos obtenidos han sido convertidos a 15 g de referencia (cantidad presente en todas las muestras), con el fin de

poder comparar directamente entre sí los diferentes resultados. Los microfósiles fueron estudiados en un microscopio estereoscópico binocular, de luz reflejada, ordenados en celdillas e identificados. En total, 206 muestras y más de 30.000 foraminíferos fueron estudiados en los sondeos de percusión extraídos. Todas las especies identificadas en las muestras aparecen en el Apéndice 3-A. Estas especies han sido divididas en indígenas y exóticas, en base al trabajo de Cearreta (1988, Tabla 2). La interpretación ambiental de las asociaciones de foraminíferos está basada en su abundancia y distribución actual en áreas estuarinas del norte de España (Cearreta 1988; Cearreta *et al.*, 2000) y en las asociaciones holocenas de foraminíferos obtenidas previamente en sondeos de la Ría de Bilbao (Cearreta, 1998).

Por su parte, las muestras utilizadas para los análisis geoquímicos fueron recogidas simultáneamente con las destinadas al análisis micropaleontológico y numeradas correlativamente, de tal manera que la comparación entre ambos indicadores fuera lo más precisa posible. Los procedimientos utilizados para su análisis y las diferentes técnicas utilizadas aparecen descritos en Cearreta *et al.* (2002a). Los análisis realizados sobre los sedimentos incluyen los metales pesados y el As, elementos que nos permiten abordar una valoración de las tendencias históricas de la contaminación, cuantificar el grado de deterioro actual de los sedimentos, y evaluar correctamente la futura regeneración ambiental. Los resúmenes estadísticos para el Fe, Mn, Ti, Zn, Pb, Cu, Ni, Cr y el As en los sedimentos preindustriales y en los sedimentos afectados antropogénicamente se presentan en la Tabla 3-1, incluida en Cearreta *et al.* (2002a).

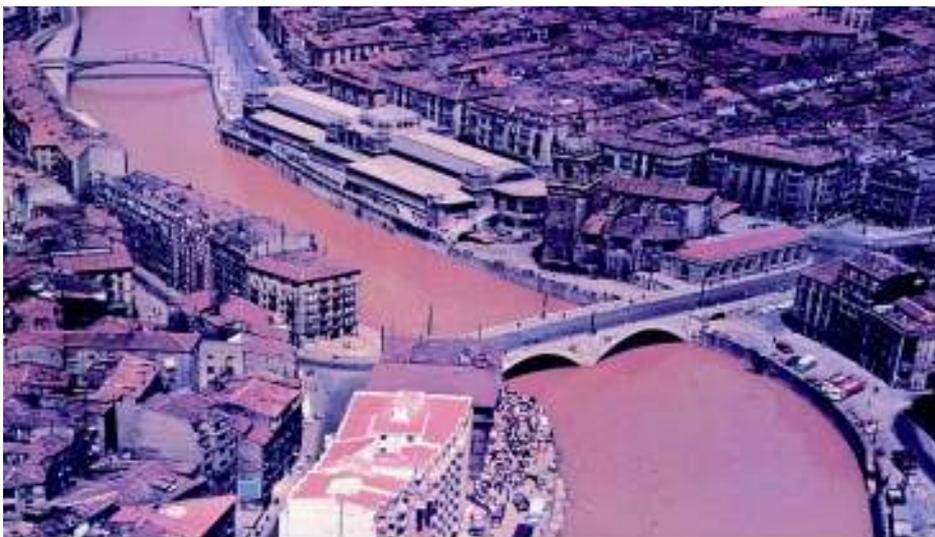


Figura 3-1 (a): Zona superior de la ría, frente al Casco Viejo de Bilbao.



Figura 3-1 (b): Zona media de la ría, desde Elorrieta (parte baja de la foto) hasta Barakaldo.



Figura 3-1 (c): Zona inferior de la ría, desembocadura en el Abra (Portugalete-Getxo).

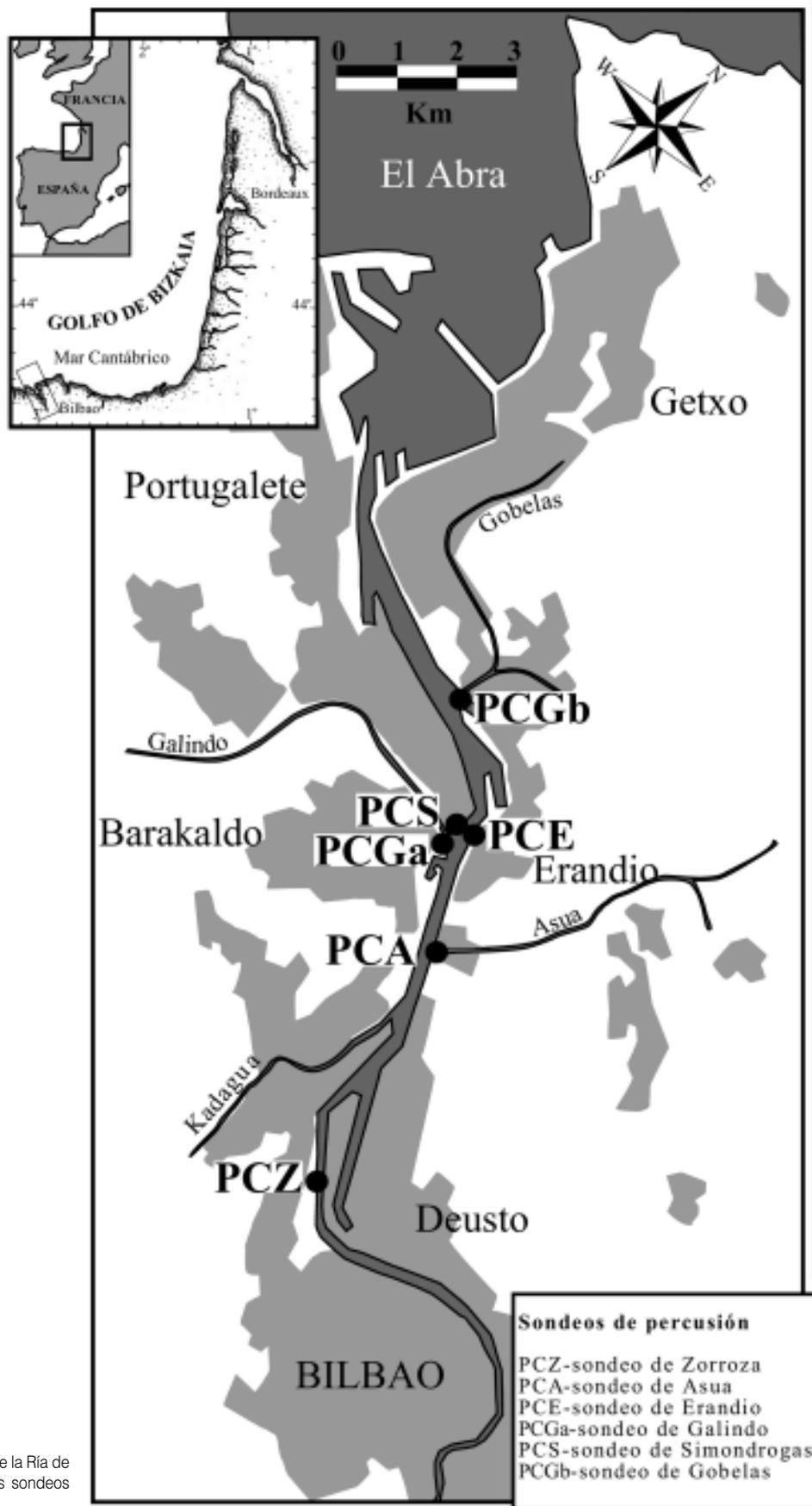


Figura 3-2: Localización geográfica de la Ría de Bilbao, mostrando la situación de los sondeos de percusión realizados.

3.3. Resultados

3.3.a) Sondeo de Percusión Zorroza (PCZ)

Este sondeo se obtuvo en una llanura intermareal de la zona superior del estuario, localizado a +0,429 m sobre el nivel local del mar (Figuras 3-2 y 3-3). Presenta 6 m de longitud y consiste en un fango arenoso negro y maloliente. El contenido en arena es bajo a lo largo del sondeo con una media del 15 %, variando entre el 1 y el 25 % (Figura 3-4). Entre -5,57 m y -4,60 m aparecen algunas gravas.

Se han encontrado un total de 5727 caparazones de foraminíferos y 36 especies (Apéndice 3-A) en las 29 muestras analizadas en este sondeo. Los resultados de los foraminíferos que se presentan en la Figura 3-4 y en la Tabla 3-2 aparecen como número de caparazones de foraminíferos por 15 g de sedimento seco para su estandarización. En base a su contenido de foraminíferos, este sondeo se puede dividir en dos Asociaciones de Foraminíferos (AF).



Figura 3-3: Perforación del sondeo Zorroza (PCZ) en la Ría de Bilbao.

Una AF2 basal, desde los -5,57 m a los 0,42 m, con foraminíferos abundantes/15 g (media 324, rango 2-865). Las muestras más profundas de esta zona están caracterizadas por tener gravas y, consecuentemente, presentan una asociación menos abundante. Esta zona está fuertemente dominada por las especies estuarinas *A. tepida* (media 61%, rango 35-76%) y *H. germanica* (media 29%, rango 16-47%), siendo la especie secundaria *C. oceanensis* (media 5%, rango 0-20%). También presenta un completo dominio de caparazones hialinos (media 100%) y una abundancia muy baja de foraminíferos exóticos (media 3%, rango 0-12%). Todo esto sugiere un depósito bajo condiciones salobres, de someras a intermareales, en un ambiente fangoso. Además, esta zona contiene frecuentes caparazones de las especies indígenas dominantes rellenos de pirita. Según Cearreta *et al.* (2002a) los metales pesados de esta zona presentan valores próximos o inferiores a los valores del fondo geoquímico local por debajo de intercalaciones de materiales aparentemente no contaminados. Este aumento de las concentraciones es consecuencia de un incremento en los aportes antropogénicos, relacionados con el desarrollo urbano e industrial del área próxima. En tanto, las intercalaciones de sedimentos aparentemente no contaminados parecen reflejar más la existencia de cambios en las velocidades de depósito y/o los efectos de una avenida de sedimentos no contaminados (debido a inundaciones o a actividades de dragado en áreas próximas menos contaminadas) que el cese esporádico de los aportes de contaminantes.

La AF1, desde -0,42 m a +0,43 m, contiene un número muy bajo de individuos/15 g (media 6, rango 0-15) y de especies (media 2, rango 0-4) que son considerados como caparazones transportados. Esta zona representa unas condiciones ambientales hostiles similares a las que se presentan hoy día en la zona superior del estuario (Capítulo 4). En cuanto a los metales pesados, aparece un marcado enriquecimiento sobre los -0,40 m coincidente con el cambio microfaunístico (Cearreta *et al.*, 2002a).

Por lo tanto, los datos de este sondeo demuestran que la moderada contaminación observada en Cearreta *et al.* (2000) en los 50 cm superficiales de la columna de sedimento en Zorroza, también afecta a los primeros 4 m de la secuencia sedimentaria.

3.3.b) Sondeo de Percusión Asua (PCA)

Este sondeo fue obtenido en una llanura intermareal del estuario medio, donde el afluente Asua

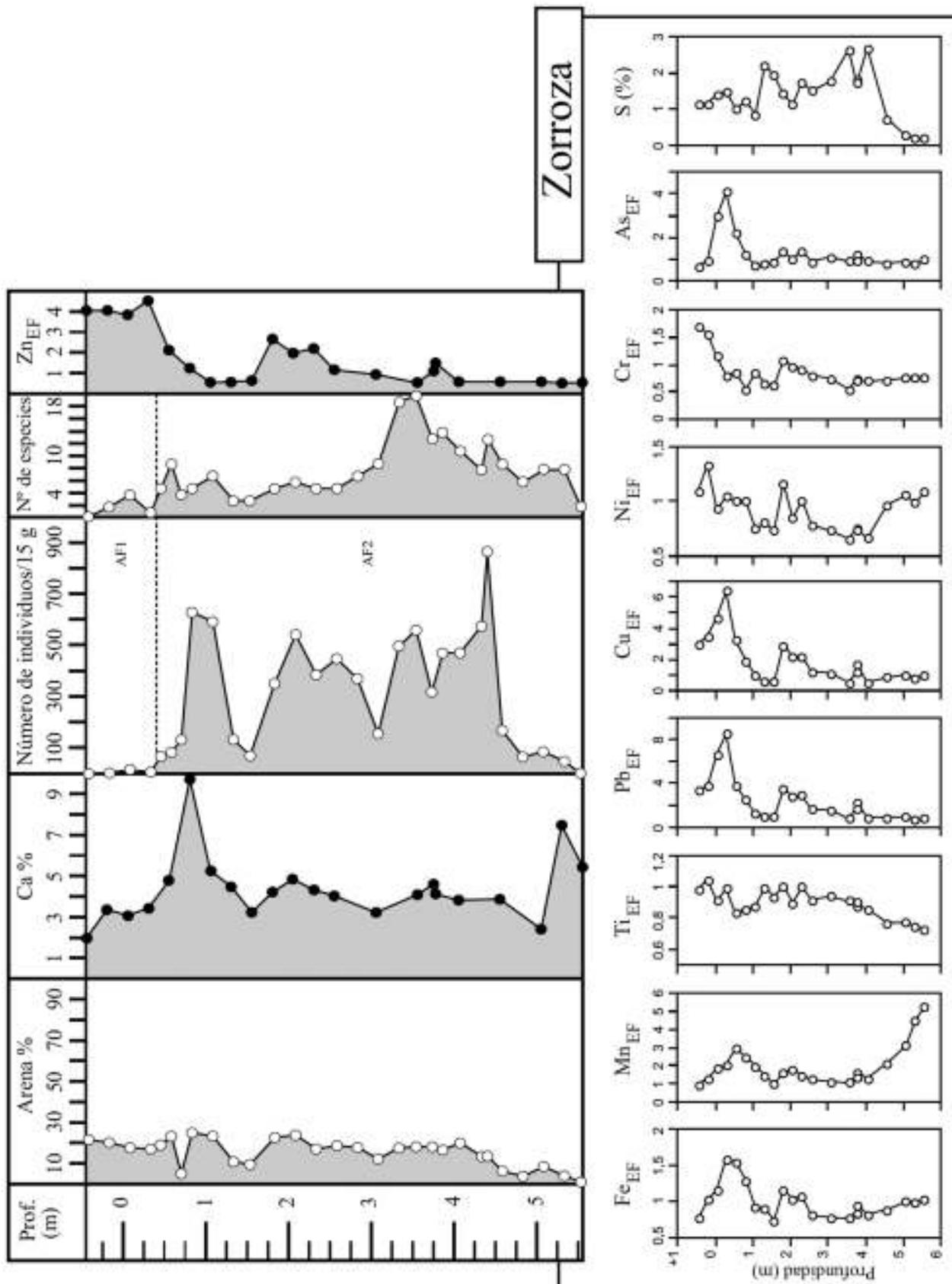


Figura 3-4: Contenido en arena (%), Ca (%), abundancia absoluta de caparzones y especies de foraminíferos, zonas basadas en la abundancia de foraminíferos y concentraciones de elementos con la profundidad (m) en el sondeo de percusión Zorroza (Ría de Bilbao). E.F.= factor de enriquecimiento. Las Asociaciones de Foraminíferos (AF) aparecen indicadas.

descarga en el cauce principal (Figuras 3-5 y 3-2). Se ubica a +0,64 m sobre el nivel local del mar. Presenta 6 m de longitud, aunque los 22 cm más altos no fueron recuperados y está formado por arena fangosa, negra y maloliente. Desde la base del sondeo hasta los -2,36 m aparecen abundantes fragmentos de madera.

En total, 5790 caparazones de foraminíferos y 72 especies (Apéndice 3-A) se han encontrado en las 23 muestras analizadas. En base a su contenido en foraminíferos, se pueden distinguir 3 Asociaciones de Foraminíferos (AF) diferentes (Figura 3-6 y Tabla 3-2).

En primer lugar, AF3, desde -5,36 m a -3,31 m, con un número extremadamente abundante de foraminíferos (media 8550, rango 2701-22644 individuos/15 g) y un número muy elevado de especies (media 33, rango 30-38). Esta asociación está dominada por las especies *R. irregularis* (media 29%, rango 16-39%), *H. germanica* (media 16%, rango 9-28%), *C. lobatulus* (media 13%, rango 7-19%) y *A. tepida* (media 11%, rango 7-20%). También presenta un predominio de caparazones hialinos (media 93%), una abundancia de foraminíferos exóticos muy elevada (media 61%, rango 42-71%) y un contenido medio en arena de 51%. Se puede interpretar como un medio marino proximal, somero a intermareal, con alta energía relativa. Contiene de manera regular caparazones de las especies indígenas dominantes rellenos de pirita.

En segundo lugar, la AF2, desde -3,31 m a -0,38 m, presenta un número extremadamente elevado de individuos/15 g (media 1192, rango 167-2488) y muy elevado de especies (media 28, rango 16-38), con las siguientes especies dominantes: *H. germanica* (media 32%, rango 17-54%), *C. lobatulus* (media 17%, rango 4-37%), *A. tepida* (media 12%, rango 8-17%) y *R. irregularis* (media 10%, rango 5-25%). También muestra una gran abundancia de caparazones hialinos (media 93%), una presencia modera-

da de foraminíferos exóticos (media 41%, rango 20-60%) y la media de contenido en arena es de 53%. Comparada con la asociación inferior, esta asociación superior sugiere un medio somero a intermareal más salobre, aunque todavía bajo condiciones de alta energía relativa. También presenta frecuentes caparazones de foraminíferos de las especies indígenas dominantes rellenos de pirita.

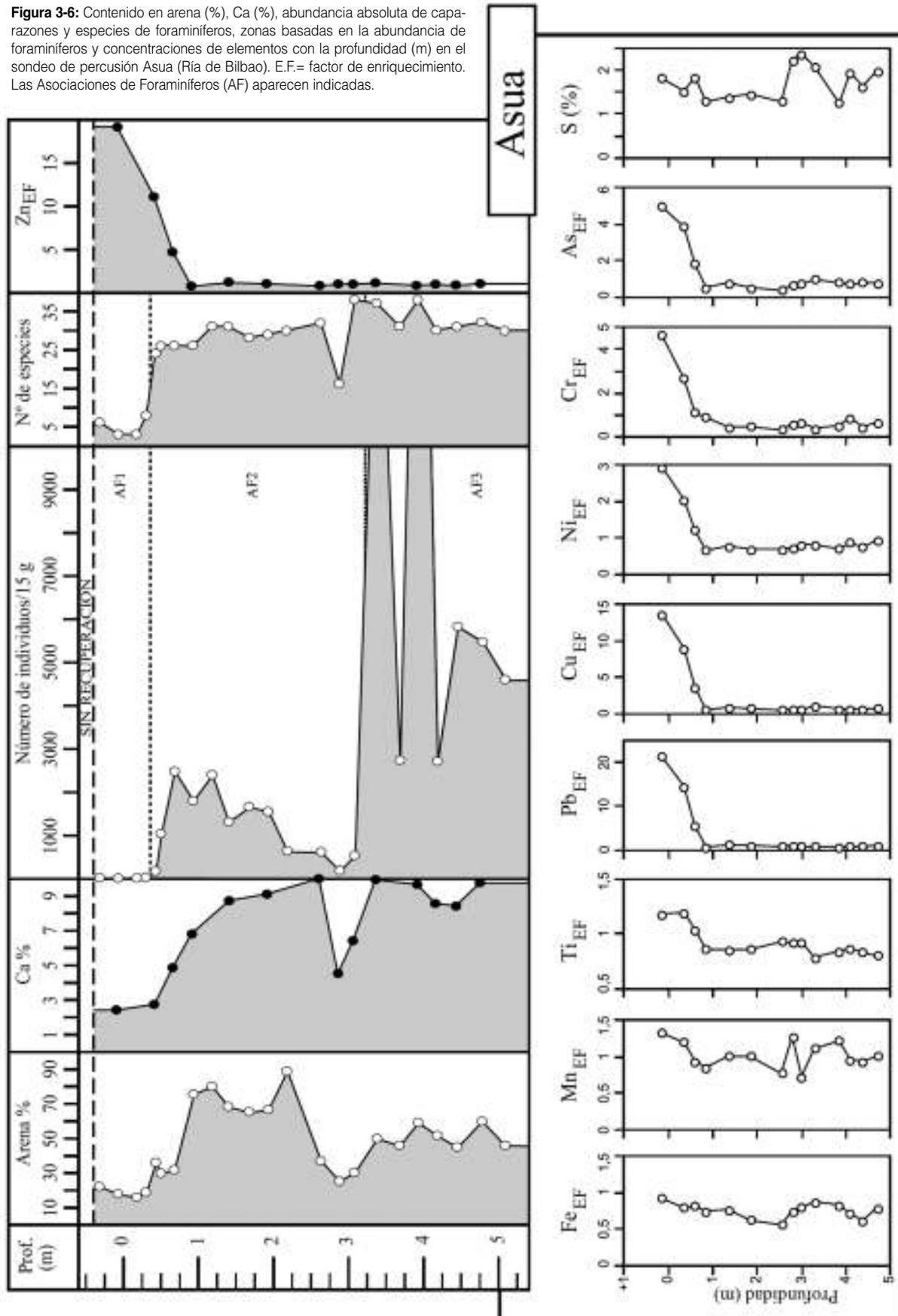
Por último, la zona superior (AF1), desde -0,38 m hasta la superficie, contiene un número muy bajo de individuos/15 g (media 8, rango 3-18) y especies (media 5, rango 3-8), que son considerados como caparazones transportados. Esta asociación parece representar condiciones medioambientales degradadas, similares a las presentes en el estuario actual. El contenido medio en arena es de 18%.

Los resultados de los análisis de metales pesados descritos en Cearreta *et al.* (2002a) muestran los cuatro metros inferiores del sondeo con valores similares al nivel geoquímico regional de fondo (Figura 3-6), con un enriquecimiento para la mayoría de los metales pesados en las muestras de la parte superior del sondeo, coincidiendo con el descenso en el número de foraminíferos. El marcado descenso en las concentraciones de metales pesados por debajo de -0,70 m, sugiere la existencia de una excavación artificial de la superficie, probablemente causada por los frecuentes dragados llevados a cabo para prevenir la significativa sedimentación y para minimizar los riesgos de inundaciones. Por tanto, el detrimento en el contenido de foraminíferos y el aparente incremento gradual en metales pesados que se observa en la parte superior del sondeo, parece más un efecto provocado por la mezcla mecánica entre sedimentos pre-industriales y materiales fuertemente contaminados durante las operaciones de dragado que la consecuencia de un continuo incremento en el nivel de industrialización.



Figura 3-5: Detalle del testigo obtenido en la perforación realizada en Asua (PCA).

Figura 3-6: Contenido en arena (%), Ca (%), abundancia absoluta de caparazones y especies de foraminíferos, zonas basadas en la abundancia de foraminíferos y concentraciones de elementos con la profundidad (m) en el sondeo de percusión Asua (Ría de Bilbao). E.F.= factor de enriquecimiento. Las Asociaciones de Foraminíferos (AF) aparecen indicadas.



3.3.c) Sondeo de Percusión Erandio (PCE)

Esta secuencia sedimentaria fue obtenida en una llanura intermareal de la parte media del estuario (Figuras 3-7 y 3-2), localizada a +0,716 m sobre el nivel del mar local. Se obtuvieron 8 m de longitud, aunque los primeros 65 cm no pudieron ser recuperados. El testigo está compuesto por arena fangosa, negra y maloliente.

En total, se encontraron 3736 caparazones de foraminíferos y 56 especies (Apéndice 3-A) en las 34 muestras analizadas. En base a su contenido en foraminíferos, se pueden distinguir dos Asociaciones de Foraminíferos (AF) en el sondeo (Figura 3-8 y Tabla 3-2).

Una AF2 basal, desde -7,28 m a -4,63 m, con una abundancia muy elevada de foraminíferos (media 405, rango 62-1001 individuos/15 g) y un moderado número de especies (media 20, rango 12-27). Esta zona está dominada por las especies *A. tepida* (media 43%, rango 23-60%), *H. germanica* (media 22%, rango 3-24%) y *C. oceanensis* (media 10%,



Figura 3-7: Detalle de la perforación en el área de Erandio (PCE).

rango 3-24%), junto con las siguientes especies secundarias: *C. lobatulus* (media 5%, rango 1-10%) y *R. irregularis* (media 5%, rango 1-9%). Así mismo, presenta un predominio de caparazones de naturaleza hialina (media 95%), una abundancia muy baja de foraminíferos exóticos (media 19%, rango 5-26%) y el contenido medio en arena es de 42%. Se interpreta como un medio arenoso, salobre y de carácter somero a intermareal. Esta zona presenta frecuentes caparazones de foraminíferos indígenas de las especies dominantes rellenos de pirita.

La AF1 superior, desde -4,63 m hasta la superficie, contiene un número muy bajo de individuos/15 g (media 12, rango 0-71) y de especies (media 4, rango 0-11) que son considerados caparazones transportados. Esta zona representa condiciones de un medio persistentemente degradado en el área estudiada. El contenido medio en arena es de 16%.

Contrariamente a lo esperado debido a la longitud del sondeo (8 m), todas las muestras recogidas en Erandio presentan contenidos en metales significativamente altos respecto al nivel geoquímico regional de fondo. Como se observaba en Asua (Figura 3-6), el marcado incremento en metales pesados y en As coincide con una dramática reducción en el contenido de foraminíferos. Aunque estas tendencias parecen reflejar un cambio ambiental gradual, también pueden deberse a una mezcla mecánica de sedimentos con diferentes niveles de contaminación durante las operaciones de dragado.

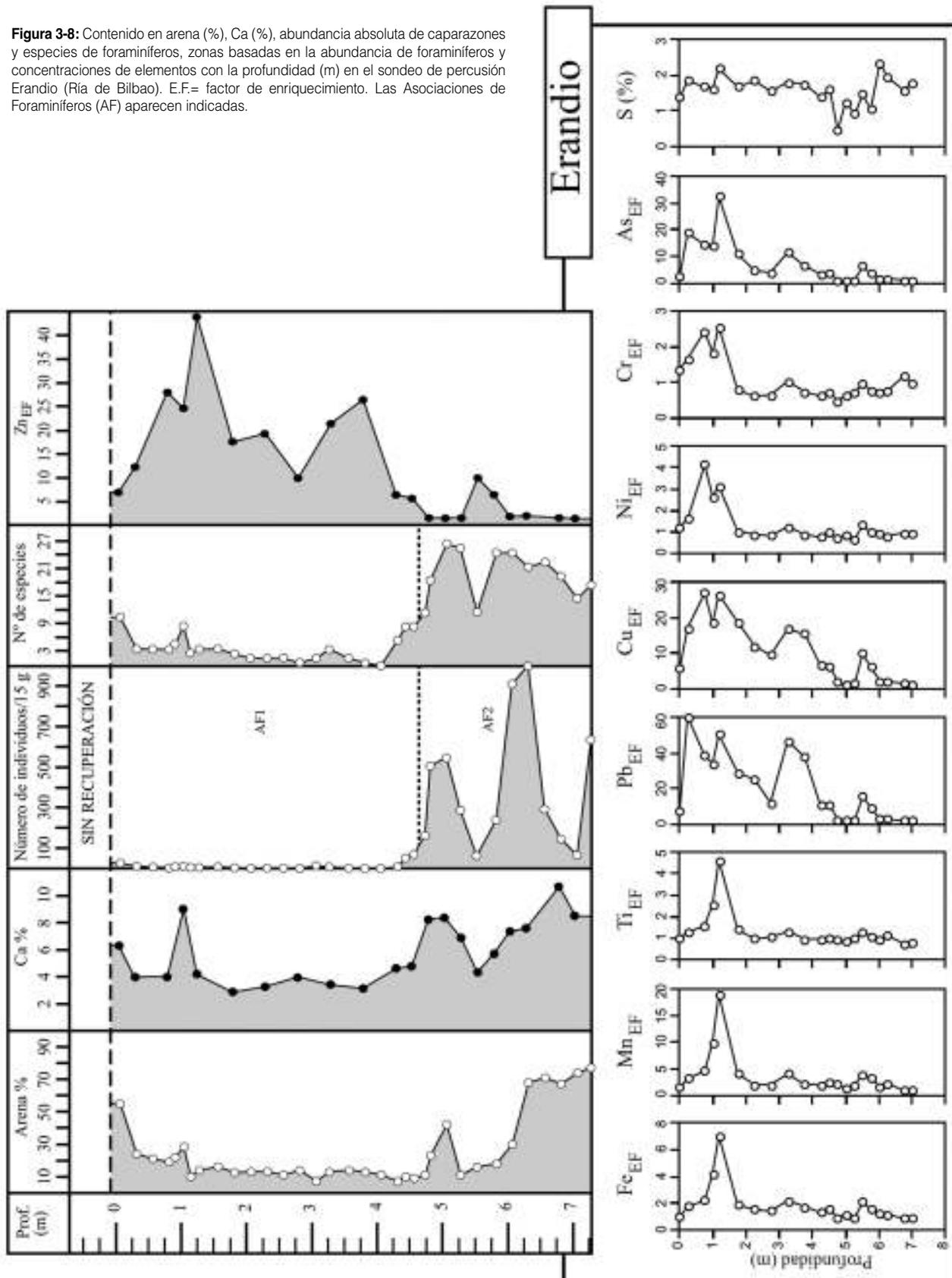
3.3.d) Sondeo de Percusión Galindo (PCGa)

Este sondeo fue perforado en una llanura intermareal de la zona media del estuario, donde el afluente Galindo desemboca en el cauce principal (Figuras 3-9 y 3-2). Se localiza a +1,905 m sobre el nivel local del mar. Tiene 10 m de longitud, aunque la sección entre +1,17 m y +0,74 m no pudo ser recuperada. Está constituido por fango arenoso, negro y maloliente. Entre -4,99 m y -4,74 m aparecen algunas gravas. El contenido en arena es bajo a lo largo del sondeo con una media de 13% y un rango de 0,5-49%.

En total, 4767 caparazones de foraminíferos y 58 especies (Apéndice 3-A) fueron encontrados en las 41 muestras analizadas. En base a la abundancia de foraminíferos, se pueden distinguir dos AF dentro del sondeo (Figura 3-10 y Tabla 3-2).

La AF2 basal, desde -8,09 m a -4,70 m, caracterizada por la presencia extremadamente abundante de foraminíferos (media 1103, rango 79-2678 indivi-

Figura 3-8: Contenido en arena (%), Ca (%), abundancia absoluta de caparazones y especies de foraminíferos, zonas basadas en la abundancia de foraminíferos y concentraciones de elementos con la profundidad (m) en el sondeo de percusión Erandio (Ría de Bilbao). E.F.= factor de enriquecimiento. Las Asociaciones de Foraminíferos (AF) aparecen indicadas.



duos/15 g), y un moderado número de especies (media 20, rango 12-29).

Esta zona está dominada por las especies *H. germanica* (media 36%, rango 22-52%), *A. tepida* (media 31%, rango 21-57%) y *C. oceanensis* (media 7%, rango 3-12%), junto con las especies secundarias *R. irregularis* (media 5%, rango 0-12%) y *B. britannica* (media 5%, rango 1-11%). También presenta un completo predominio de caparazones hialinos (media 97%) y una abundancia muy baja de foraminíferos exóticos (media 14%, rango 3-29%). Esta asociación sugiere un ambiente fangoso, salobre y con una profundidad somero a intermareal. Contiene frecuentes rellenos de pirita en los caparazones de las especies indígenas dominantes, de ahí, la buena correlación entre el Ca y el S (Cearreta *et al.*, 2002a).

La AF1, desde -4,70 m a +1,90 m, contiene un número muy bajo de individuos/15g (media 6, rango 0-57) y de especies (media 2, rango 0-11), que se consideran caparazones transportados. Esta zona representa el depósito de sedimentos bajo unas condiciones de escasa calidad ambiental en este área estuarina.

La evolución vertical en los patrones de los metales pesados y del As en Galindo son muy similares a los encontrados en Erandio (Cearreta *et al.*, 2002a), con un enriquecimiento general a lo largo de todo el sondeo (Figura 3-10). Sobre los -4,70m aparece un

marcado incremento, que coincide con la desaparición de los foraminíferos. Así mismo, también se observa un enriquecimiento general en Fe (máx EF= 3,7) en los sedimentos de la parte superior del sondeo, presumiblemente relacionado con las enormes descargas antropogénicas derivadas de la explotación local de hierro y de las fundiciones metálicas en el río Galindo y en la Ría de Bilbao en general.

3.3.e) Sondeo de Percusión Simondrogas (PCS)

Este sondeo se obtuvo en una llanura intermareal del estuario medio, localizado a +1,395 m sobre el nivel local del mar (Figuras 3-11 y 3-2). Presenta 10 m de longitud, y está formado por fango arenoso, negro y maloliente.

En total, se extrajeron 2493 caparazones de foraminíferos y 32 especies (Apéndice 3-A) en las 44 muestras analizadas. En base al contenido en foraminíferos, se pueden distinguir dos Asociaciones de Foraminíferos diferentes en este sondeo (Figura 3-12 y Tabla 3-2).

La AF2 basal, desde -8,60 m a -7,12 m, tiene un contenido muy elevado de foraminíferos (media 476, rango 182-977 individuos/15 g) y un moderado número de especies (media 17, rango 15-19). Esta división parece coincidir con los datos obtenidos del estudio geoquímico, ya que a -7,12 m se observa un fuerte cambio composicional.



Figura 3-9: Vista general de la zona de muestreo en Galindo. El sondeo PCGa se realizó en la orilla izquierda de la ría.

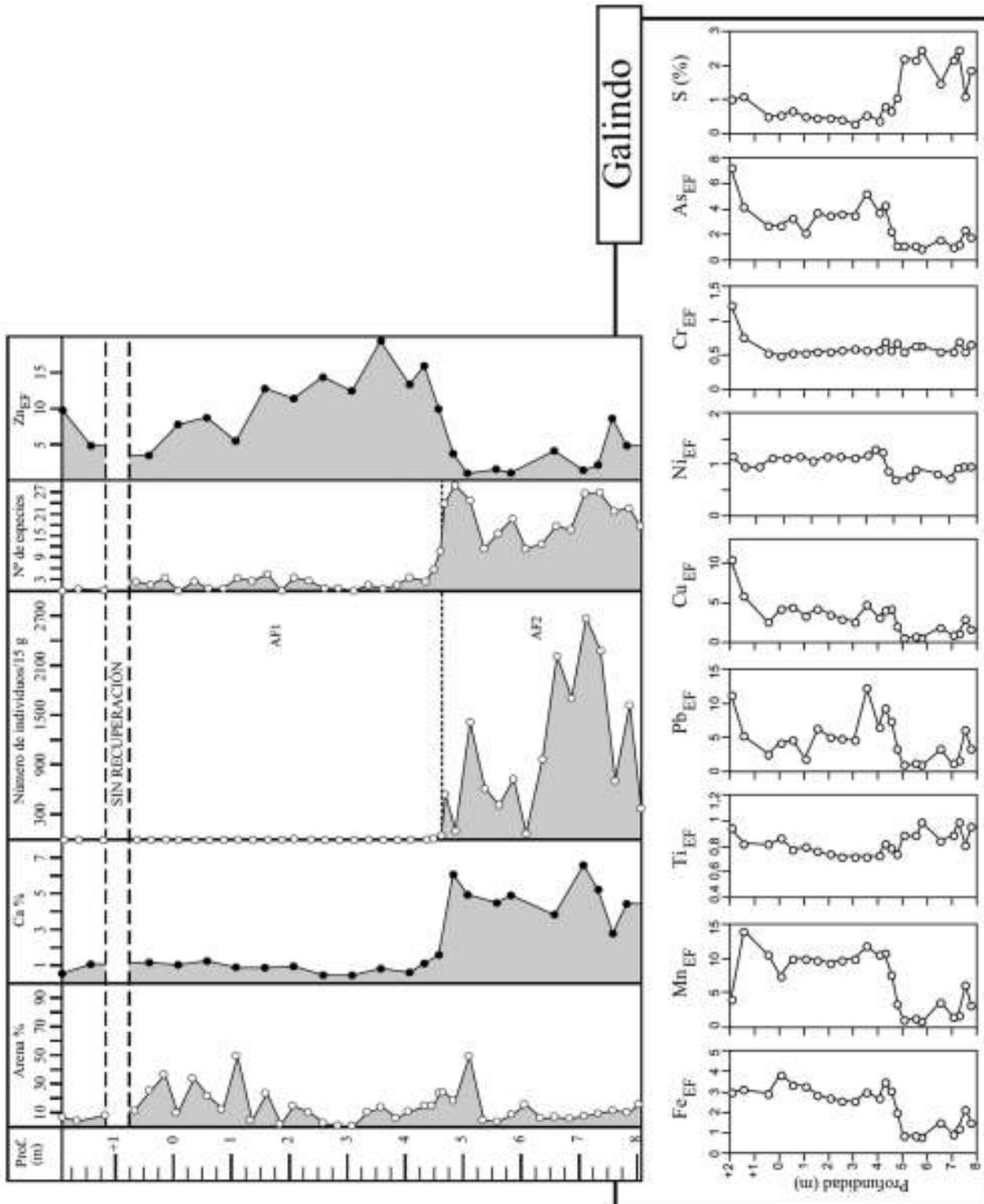


Figura 3-10: Contenido en arena (%), Ca (%), abundancia absoluta de caparazones y especies de foraminíferos, zonas basadas en la abundancia de foraminíferos y concentraciones de elementos con la profundidad (m) en el sondeo de percusión Galindo (Ría de Bilbao). E.F.= factor de enriquecimiento. Las Asociaciones de Foraminíferos (AF) aparecen indicadas.



Figura 3-11: Detalle de la perforación en la zona de Simondrogas (PCS), con Erandio al fondo.

Esta zona está dominada por las especies *C. lobatulus* (media 41%, rango 29-52%), *A. tepida* (media 23%, rango 18-31%) y *H. germanica* (media 13%, rango 8-20%), y como especies secundarias aparecen *R. anomala* (media 8%, rango 5-9%) y *R. irregularis* (media 4%, rango 5-9%). También presenta un dominio de los caparazones hialinos (media 96%), una elevada abundancia de foraminíferos exóticos (media 60%, rango 44-69%) y la media de contenido en arena es de 70%. Esta asociación sugiere un medio marino-proximal, somero a intermareal y de alta energía. Esta zona presenta frecuentes caparazones de foraminíferos de las especies indígenas dominantes con relleno de pirita, coincidente con elevados niveles de S (Cearreta *et al.*, 2002a). Así mismo, los sedimentos presentan un elevado componente carbonatado y los niveles de los metales pesados se encuentran próximos a los niveles de fondo geoquímico.

La AF1, desde -7,12 m a +1,39 m, contiene un número muy bajo de individuos/15g (media 6, rango 0-29) y de especies (media 2, rango 0-7) que han sido considerados como caparazones transportados. Esta zona, donde el contenido medio en arena es de 18,4%, representa un gran volumen de sedimentos depositados bajo unas condiciones ambientales muy degradadas en el estuario inferior. Con respecto a la zona basal, estos sedimentos de grano fino muestran un incremento en los valores de los metales pesados, con concentraciones claramente enriquecidas en Fe. Al igual que ocurre en Galindo (unos cientos de metros corriente arriba, Figura 3-2), niveles altos de este metal parecen confirmar la influencia de la minería de hierro y de la industria del acero locales (Cearreta *et al.*, 2002a).

3.3.f) Sondeo de Percusión Gobelas (PCGb)

Este sondeo se obtuvo en una llanura intermareal del estuario inferior, donde el afluente Gobelas descarga en el canal principal (Figuras 3-13 y 3-2). Está localizado a +0,755 m sobre el nivel del mar local. Tiene 8 m de longitud, aunque los primeros 48 cm y la sección entre -2,34 m y -1,97 m no se pudieron recuperar. Está formado por arena fangosa, negra y maloliente.

En total, 9418 caparazones de foraminíferos y 89 especies (Apéndice 3-A) fueron encontrados en las 36 muestras analizadas. En base al contenido de foraminíferos, se pueden distinguir tres Asociaciones de Foraminíferos diferentes en este sondeo (Figura 3-14, Tabla 3-2).

En primer lugar, la asociación inferior (AF3), desde -7,25 m a -2,65 m, con caparazones de foraminíferos extremadamente abundantes (media 1094, rango 32-4656 individuos/15 g) y un número muy elevado de especies (media 26, rango 19-33). Esta asociación está dominada por las especies *A. tepida* (media 35%, rango 22-55%), *H. germanica* (media 16%, rango 8-24%), *C. lobatulus* (media 14%, rango 4-28%) y *R. irregularis* (media 13%, rango 5-23%), junto a la especie secundaria *C. oceanensis* (media 5%, rango 0-14%). Presenta un elevado predominio de caparazones hialinos (media 95%), una abundancia moderada de foraminíferos exóticos (media 39%, rango 13-65%) y un contenido medio en arena de 45%. Esta asociación es indicativa de un medio salobre, de somero a intermareal y de alta energía. Se presentan regularmente en esta asociación caparazones de las especies indígenas dominantes rellenos de pirita.

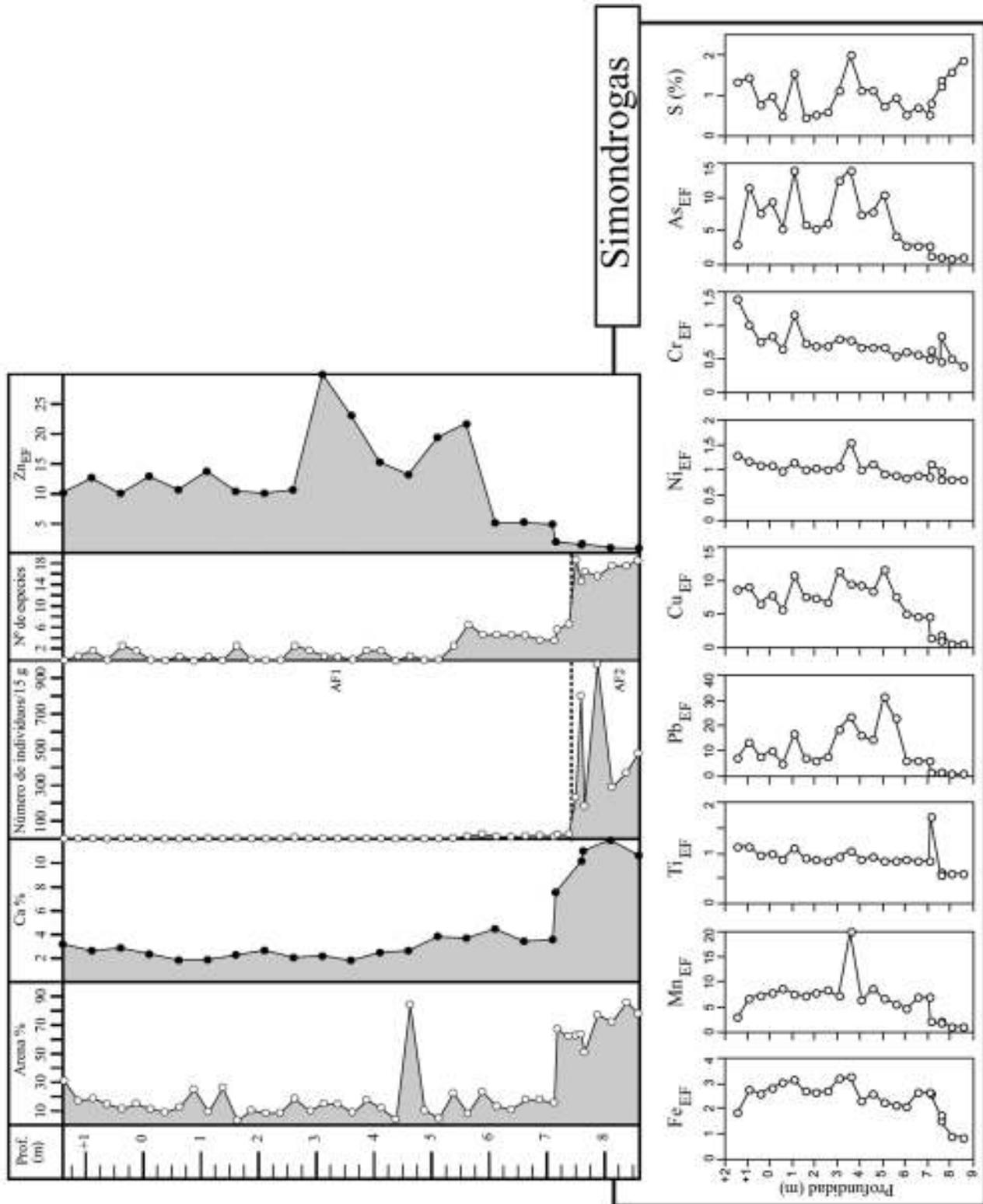


Figura 3-12: Contenido en arena (%), Ca (%), abundancia absoluta de caparazones y especies de foraminíferos, zonas basadas en la abundancia de foraminíferos y concentraciones de elementos con la profundidad (m) en el sondeo de percusión Simondrogas (Ría de Bilbao). E.F.= factor de enriquecimiento. Las Asociaciones de Foraminíferos (AF) aparecen indicadas.

En segundo lugar, la AF2, desde -2,65 m a -0,64 m, contiene un elevado número de individuos/15 g (media 188, rango 0-252) y un elevado número de especies (media 23, rango 0-32), con las siguientes especies dominantes: *A. tepida* (media 29%, rango 0-80%), *H. germanica* (media 11%, rango 0-24%) y *C. lobatulus* (media 10%, rango 0-26%), y como especies secundarias *R. irregularis* (media 6%, rango 0-16%) y *C. oceanensis* (media 4%, rango 0-11%). También presenta un gran predominio de caparazones hialinos (media 94%), una abundancia moderada de foraminíferos exóticos (media 25%, rango 0-52%) y un contenido medio de arena de 77%. Esta asociación es interpretada como un depósito sedimentario en un medio arenoso, salobre y en condiciones de profundidad de someras a intermareales. Contiene un menor número de foraminíferos con respecto a la asociación inferior y presenta un patrón vertical similar al que aparecía en Simondrogas para el Ca, por debajo de los -0,75 m los sedimentos son ricos en carbonato (Figura 3-14). La mayoría de los metales pesados muestran valores de fondo por debajo de -3,75 m, con un ligero enriquecimiento entre -3,75 m y -2,50 m (Cearreta *et al.*, 2002a).

Por último, la zona superior (AF1), desde -0,64 m hasta la superficie, contiene un número bajo de individuos/15 g (media 22, rango 0-69), que son consi-

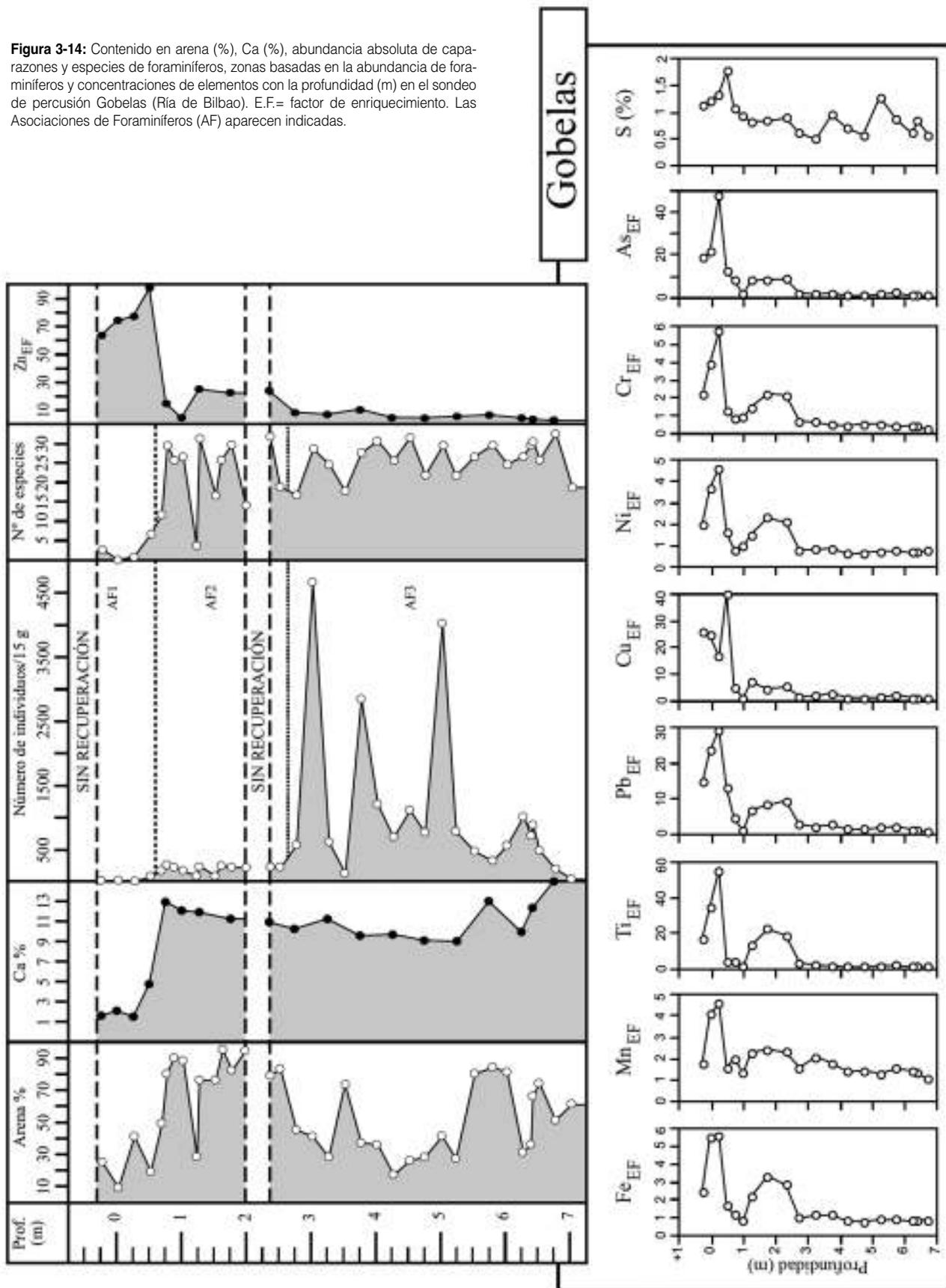
derados caparazones transportados, un número muy bajo de especies (media 3, rango 0-7) y el contenido medio en arena es de 23%. Esta zona representa unas condiciones ambientales muy hostiles, similares a las que se encuentran hoy a lo largo del estuario. Coincidente con este declive en la abundancia de los foraminíferos, aparece un intervalo con un significativo incremento en la mayoría de los metales pesados (Cearreta *et al.*, 2002a).

Es importante señalar que los contenidos en Ti se mantienen próximos a los valores pre-industriales en la mayoría de los sondeos analizados, excepto en el sondeo Gobelás donde este metal presenta una concentración extremadamente alta por encima de -2,65 m de profundidad (Figura 3-14). Este enriquecimiento es debido a la proximidad de una planta de producción de TiO_2 que ha provocado una enorme contaminación por Ti durante décadas recientes (1951-1986). En un depósito continuo de sedimentos, la primera aparición debería recoger el inicio de la actividad en esta planta a partir de 1951. Sin embargo, los intensos dragados realizados en esta ría han podido destruir este límite temporal. En cualquier caso, al menos es posible confirmar que los 3,25 m superiores del sondeo han sido depositados en menos de 50 años, sugiriendo una velocidad de sedimentación extremadamente rápida en este estuario contaminado.



Figura 3-13: Detalle de la perforación en la zona de desembocadura del Gobelás. El sondeo de percusión PCGb se realizó a la derecha del dique.

Figura 3-14: Contenido en arena (%), Ca (%), abundancia absoluta de caparazones y especies de foraminíferos, zonas basadas en la abundancia de foraminíferos y concentraciones de elementos con la profundidad (m) en el sondeo de percusión Gobelas (Ría de Bilbao). E.F.= factor de enriquecimiento. Las Asociaciones de Foraminíferos (AF) aparecen indicadas.



3.4. Discusión

En base a la combinación de los resultados obtenidos a partir de los indicadores microfaunísticos y geoquímicos, es posible distinguir tres zonas ambientales diferentes dentro del registro sedimentario reciente de la Ría de Bilbao (Figura 3-15). En primer lugar, una **zona pre-industrial** con un contenido en foraminíferos muy abundante y niveles geoquímicos de fondo para los metales. Este nivel ha sido identificado en Zorroza (AF2), Asua (AF3/AF2), Simondrogas (AF2) y Gobelas (AF3). En segundo lugar, la **zona industrial antigua** (zona industrial con microfauna) caracterizada por la coexistencia de foraminíferos abundantes junto con elevados niveles de algunos metales pesados. Este nivel ha sido identificado en Zorroza (AF2), Erandio (AF2), Galindo (AF2) y Gobelas (AF2). Finalmente, la **zona industrial reciente** (zona industrial sin microfauna) definida por unas concentraciones extremadamente altas de metales y un número muy reducido de caparazones de foraminíferos. Este nivel más alto se puede encontrar a diferentes profundidades y con una gran variabilidad de espesores en todos los sondeos (AF1 de todos los sondeos).

3.4.a) El registro sedimentario en la Ría de Bilbao: época pre-industrial

Los materiales de la zona pre-industrial (sedimentos con niveles de metales similares al fondo geoquímico) se han encontrado tanto en la zona superior como en la inferior de la Ría de Bilbao (Figura 1-6). Sin embargo, no se ha podido muestrear en la zona media del estuario (Figura 3-15), probablemente debido a las intensas operaciones de dragado desarrolladas en este área (alcanzando mayor profundidad) donde la industria y las actividades marítimas se han concentrado históricamente con más intensidad. Las asociaciones de foraminíferos encontradas en esta zona pre-industrial son idénticas a las estudiadas en el registro sedimentario holoceno de este estuario (Capítulo 2), con una asociación indígena básica formada por las especies dominantes *A. tepida*/*H. germanica* y como especie secundaria *C. oceanensis*, junto con un incremento en los porcentajes de foraminíferos exóticos (principalmente *C. lobatulus* y *R. irregularis*) desde el estuario superior hasta el inferior. En general, el número de individuos es muy alto en esta zona pre-industrial y la diversidad de especies se incrementa hacia la desembocadura del estuario, debido al incremento en la abundancia de foraminíferos exóticos. Por otra parte,

la concentración de metales pesados y de As en estos sedimentos es similar a los resultados obtenidos en los análisis de los sondeos profundos del Holoceno de este mismo estuario (una vez ajustado el efecto derivado de las diferencias en el tamaño de grano del sedimento; Cearreta *et al.*, 2002a). Esta zona pre-industrial contiene caparazones de foraminíferos indígenas de las especies dominantes rellenos con pirita diagenética. En este sentido, cabe reseñar que la formación de pirita autigénica está controlada principalmente por la disponibilidad de Fe reactivo, sulfato y materia orgánica (Berner, 1984; Varekamp, 1991), y que los ambientes de elevada salinidad pueden proveer del adecuado aporte de S para permitir la precipitación de este mineral (Thomas y Varekamp, 1991).

3.4.b) El registro sedimentario en la Ría de Bilbao: periodo industrial

En el registro sedimentario correspondiente al periodo industrial (es decir, con elevadas concentraciones de metales), es posible diferenciar dos zonas (Figura 3-15): una primera zona industrial antigua, caracterizada por la coexistencia de una abundante asociación de foraminíferos con altos niveles de metales, y una segunda zona industrial reciente con niveles extremadamente altos de metales y desprovista de foraminíferos indígenas.

En los sondeos de percusión donde la zona industrial antigua (Zorroza y Gobelas) yace sobre la zona pre-industrial, sus respectivas asociaciones de foraminíferos son similares entre sí en términos de especies dominantes. Sin embargo, la zona industrial antigua presenta un menor número de individuos y de especies en comparación con la asociación pre-industrial. Este efecto se ha observado también en otras áreas costeras contaminadas (Yanko *et al.*, 1994). La falta de dataciones hace imposible determinar si ambas zonas son continuas en el tiempo o, por el contrario, están separadas temporalmente debido a los intensos dragados efectuados a lo largo del estuario desde el siglo XIX. En Galindo y Erandio, donde la zona industrial antigua ocupa la parte basal de los sondeos y donde no se ha podido obtener registro pre-industrial, la asociación de foraminíferos es muy abundante, el número de especies es moderado y las especies dominantes son similares a las encontradas en el registro pre-industrial del estuario. Esta zona industrial antigua indica claramente que, durante un cierto periodo de tiempo, una asociación normal de foraminíferos

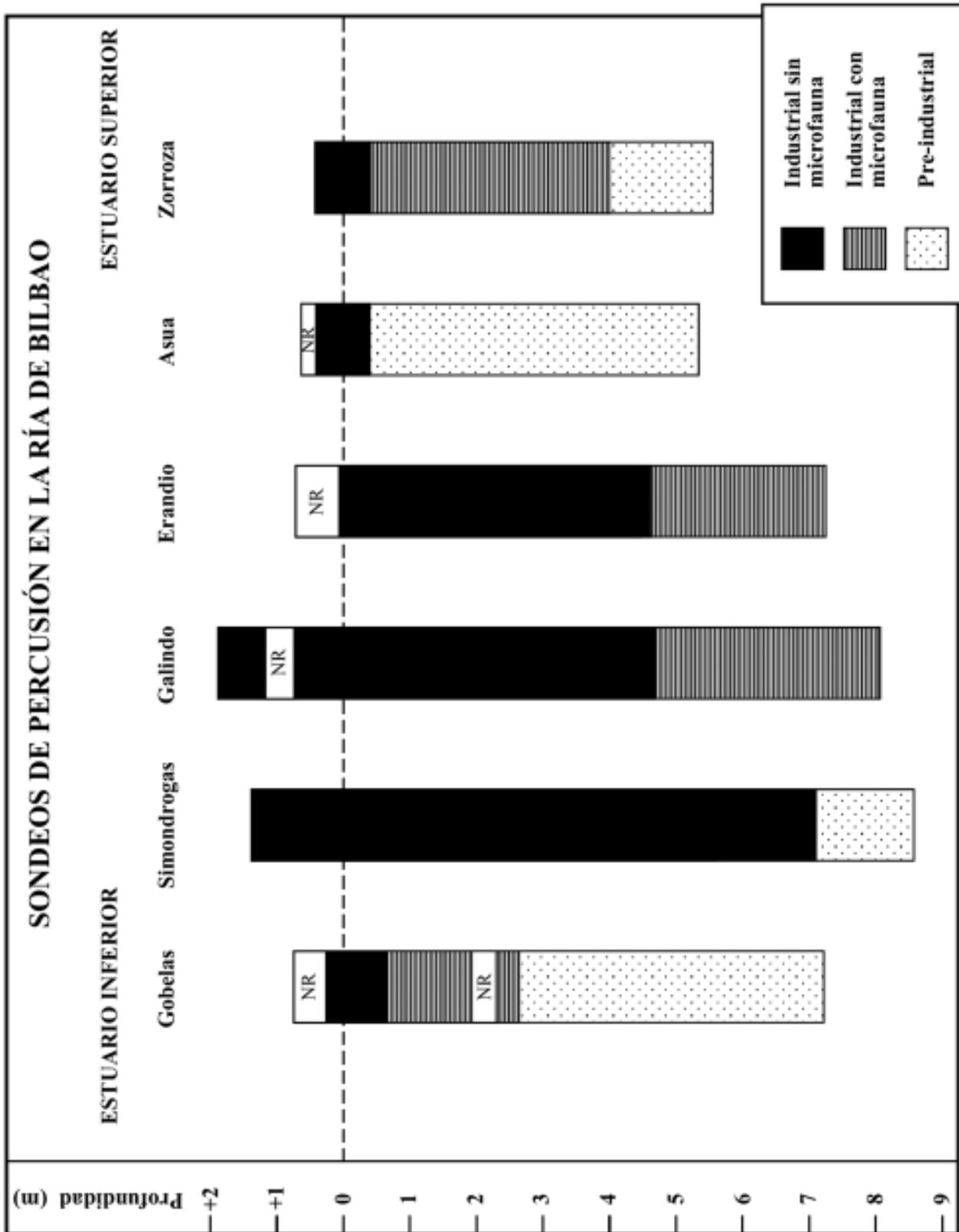


Figura 3-15: Interpretación ambiental de los sondeos de percusión de la Ría de Bilbao basada en la combinación de los resultados microfaunísticos y geoquímicos. N.R.= sin recuperación.

pudo vivir y reproducirse en un medio estuarino moderadamente contaminado, periodo que probablemente corresponda a la primera parte del desarrollo industrial en este estuario (periodo 1850-1950), como se puede deducir del registro histórico escrito (García-Merino, 1987). Esta zona industrial más antigua contiene también caparazones de foraminíferos de las principales especies indígenas con relleno de pirita diagenética (factor característico de la zona pre-industrial).

Por otra parte, la zona industrial reciente se presenta como un manto cubriendo la parte superior de todos los sondeos, aunque el espesor de esta zona altamente contaminada varía ampliamente a lo largo del estuario. Los volúmenes más grandes de este "manto contaminado" se encuentran en el estuario medio, donde las actividades de dragado han sido históricamente más intensas (Figura 3-15). Esta zona corresponde temporalmente a la segunda parte del desarrollo industrial en la Ría de Bilbao (periodo 1950-2000), cuando la cantidad de aportes urbanos e industriales al estuario alcanza su máximo, provocando un mínimo en los niveles de oxígeno y concentraciones extremadamente altas de metales y materia orgánica. Como consecuencia, se produjo una completa extinción de los foraminíferos indígenas, seguida de una degradación de las condiciones ambientales en el estuario que han persistido hasta la actualidad (Capítulos 4 y 5).

Las elevadas concentraciones de metales pesados y As encontradas en el estudio geoquímico de estos sondeos reflejan la intensa degradación ambiental de la Ría de Bilbao. No obstante, los resultados obtenidos muestran una considerable variabilidad espacial, incluso cuando las muestras se toman en sondeos adyacentes (Tabla 3-1). Los niveles más bajos de enriquecimiento en metales se encontraron en la zona superior del estuario (Zorroza), mientras que los valores más altos aparecen en la parte media (Erando). Esta distribución heterogénea refleja la proximidad a los puntos de vertidos contaminantes, que descargan directamente sobre el estuario o en los tramos inferiores de los cuatro tributarios principales. Relacionado con esto, es importante resaltar la abundancia de foraminíferos coexistentes con elevadas concentraciones de metales pesados en la zona industrial antigua de Erando mientras que, por el contrario, están ausentes en la zona industrial reciente de Zorroza que presenta niveles inferiores de contaminación por metales. Este hecho apoya la idea de

que el nivel de oxígeno es el factor clave en la explicación de la completa extinción de la biota de la Ría de Bilbao, tal y como se refleja en la zona industrial reciente, aunque los elevados niveles de contaminación también contribuyen a la severa degradación histórica de este ecosistema (Sáiz-Salinas *et al.*, 1996; Cearreta *et al.*, 2000). Las variaciones en las concentraciones de los metales según la profundidad dentro de los sondeos pueden ser consecuencia de la variación en los aportes antropogénicos, de las reacciones diagenéticas tempranas y del reabajamiento físico de los sedimentos. Desafortunadamente, no existen archivos históricos detallados que podrían documentar tendencias temporales en los flujos antropogénicos hacia la Ría de Bilbao. En cualquier caso, la distribución vertical de los metales en los sondeos estudiados sugiere que, históricamente, las concentraciones de Zn, Pb, y Cu (y probablemente As) comienzan a crecer tempranamente en el estuario, seguidas posteriormente por el Cr y Ni.

3.5. Conclusiones

Los seis sondeos perforados en las llanuras mareales de la Ría de Bilbao reflejan el extenso registro de los aportes antropogénicos en este medio. Estos aportes han provocado la desaparición de la microfauna indígena como consecuencia de la significativa contaminación en los sedimentos. Es posible diferenciar tres zonas en el registro sedimentario reciente. La zona inferior, en la que se reflejan las condiciones estuarinas pre-industriales, está caracterizada por asociaciones de foraminíferos biodiversas y abundantes con un nivel de metales pesados similar o inferior al nivel geoquímico de fondo. La segunda zona, la zona industrial antigua (periodo 1850-1950), está caracterizada por elevadas concentraciones de metales en el estuario que permitieron la existencia de asociaciones de foraminíferos relativamente abundantes. La tercera zona, la zona industrial reciente (periodo 1950-2000), está caracterizada por la desaparición de las asociaciones de foraminíferos, probablemente causada por niveles de oxígeno mínimos durante este periodo. Estas dos últimas zonas forman el registro sedimentario del periodo industrial. Los resultados obtenidos aportan una valiosa información a tener en cuenta de cara a la regeneración ambiental de la Ría de Bilbao, ya que los sedimentos han demostrado ser un gran almacén para los contaminantes y los foraminíferos.

Asociación de Foraminíferos		Fe	Mn	Ti	Zn	Pb	Cu	Ni	Cr	As
Sedimentos pre-industriales										
AF2-PCS	(n=47)									
AF2-PCA	Media	2.5±1.0	0.04±0.03	0.32±0.12	60±22	23±9	19±8	20±10	76±34	16±6
AF3	Rango	0.8-5.3	0.01-0.15	0.09-0.62	10-105	10-52	6-57	8-51	15-147	8-37
Sedimentos con influencia antropogénica										
Sondeo de Zorroza										
	(n=17)									
	Media	4.5±1.0	0.05±0.02	0.46±0.03	213±146	96±71	64±47	33±5	119±44	34±23
	Rango	3.3-6.8	0.03-0.09	0.36-0.50	77-516	25-284	15-182	25-43	61-236	16-100
Sondeo de Asua										
	(n=4)									
	Media	3.1±0.6	0.03±0.01	0.44±0.13	807±772	345±311	186±135	55±39	275±255	70±47
	Rango	2.4-3.8	0.03-0.04	0.29-0.57	100-183	139-727	25-393	22-106	53-617	26-126
Sondeo de Erandio										
AF1	(n=21)									
AF2-PCGb	Media	6.6±4.2	0.10±0.11	0.55±0.32	1061±980	662±604	272±225	40±26	126±65	161±179
AF2-PCGa	Rango	2.1-21.9	0.02-0.55	0.24-1.81	94-3361	44-1964	24-741	18-133	63-298	19-713
Sondeo de Galindo										
AF2-PCE	(n=23)									
AF2-PCZ	Media	9.9±4.0	0.21±0.12	0.42±0.04	782±578	162±113	91±66	39±11	84±22	72±42
	Rango	3.1-13.5	0.02-0.40	0.29-0.49	87-2028	28-439	14-313	23-60	55-172	20-189
Sondeo de Simondrogas										
	(n=21)									
	Media	10.5±2.9	0.20±0.11	0.45±0.10	1151±764	380±293	206±95	35±9	98±27	166±109
	Rango	3.7-14.2	0.05-0.58	0.18-0.63	91-2970	29-1147	21-366	17-60	42-156	17-365
Sondeo de Gobelas										
	(n=13)									
	Media	5.6±4.3	0.07±0.03	4.4±5.4	460±501	250±246	250±319	34±26	159±146	217±259
	Rango	1.3-15.1	0.04-0.13	0-27-18.3	42-1637	23-793	16-1071	11-92	30-530	24-951

Tabla 3-1: Abundancia de diferentes elementos químicos en los sondeos de percusión de la Ría de Bilbao. Los valores se representan en mg/kg excepto para el Fe, Mn y Ti (% en peso).

	PCGb Gobelos	PCS Simondrogas	PCGa Galindo	PCE Erandío	PCA Asua	PCZ Zorroza
ZONA INDUSTRIAL RECIENTE	AF 1: 22 (0-69) caparazones/15g 3 (0-7) especies caparazones transportados % arena: 23 Espesor: 1,39 m	AF 1: 6 (0-29) caparazones/15g 2 (0-7) especies caparazones transportados % arena: 18 Espesor: 8,51 m	AF 1: 6 (0-57) caparazones/15g 2 (0-11) especies caparazones transportados % arena: 59 Espesor: 6,60 m	AF 1: 12 (0-71) caparazones/15g 4 (0-11) especies caparazones transportados % arena: 16 Espesor: 5,35 m	AF 1: 8 (3-18) caparazones/15g 5 (3-8) especies caparazones transportados % arena: 18 Espesor: 1,02 m	AF 1: 6 (0-15) caparazones/15g 2 (0-4) especies caparazones transportados % arena: 19 Espesor: 0,85 m
ZONA INDUSTRIAL ANTIGUA	AF 2: 188 (0-252) caparazones/15g 23 (0-32) especies 25 (0-52) % exóticos A. <i>tepidá</i> 29 (0-80) % H. <i>germanica</i> 11 (0-24) % C. <i>lobatulus</i> 10 (0-26) % R. <i>irregularis</i> 6 (0-16) % C. <i>oceanensis</i> 4 (0-11) % % arena: 77 Espesor: 2,01 m		AF 2: 1103 (79-2678) caparazones/15g 20 (12-29) especies 14 (3-29) % exóticos H. <i>germanica</i> 36 (22-52) % A. <i>tepidá</i> 31 (21-57) % C. <i>oceanensis</i> 7 (3-12) % R. <i>irregularis</i> 5 (0-12) % B. <i>britannica</i> 5 (1-11) % Caparazones rellenos con pirita % arena: 49 Espesor: 3,39 m	AF 2: 405 (62-1001) caparazones/15g 20 (12-27) especies 19 (5-26) % exóticos A. <i>tepidá</i> 43 (23-60) % H. <i>germanica</i> 22 (10-32) % C. <i>oceanensis</i> 10 (3-24) % C. <i>lobatulus</i> 5 (1-10) % R. <i>irregularis</i> 5 (1-9) % Caparazones rellenos con pirita % arena: 42 Espesor: 2,65 m		AF 2: 324 (1-865) caparazones/15g 8 (2-20) especies 3 (0-12) % exóticos A. <i>tepidá</i> 61 (35-76) % H. <i>germanica</i> 29 (16-47) % C. <i>oceanensis</i> 5 (0-20) % Caparazones rellenos con pirita % arena: 15 Espesor: 5,15 m
ZONA PRE-INDUSTRIAL	AF 3: 1094 (32-4657) caparazones/15g 26 (19-33) especies 39 (13-65) % exóticos A. <i>tepidá</i> 35 (22-55) % H. <i>germanica</i> 16 (8-24) % C. <i>lobatulus</i> 14 (4-28) % R. <i>irregularis</i> 13 (5-23) % C. <i>oceanensis</i> 5 (0-14) % Caparazones rellenos con pirita % arena: 45 Espesor: 4,60 m	AF 2: 476 (182-977) caparazones/15g 17 (15-19) especies 60 (44-69) % exóticos C. <i>lobatulus</i> 41 (29-52) % A. <i>tepidá</i> 23 (18-31) % H. <i>germanica</i> 13 (7-20) % R. <i>anomala</i> 7 (5-9) % R. <i>irregularis</i> 4 (2-9) % Caparazones rellenos con pirita % arena: 70 Espesor: 1,48 m			AF 2: Asociación 2: 1192 (167-2488) caparazones/15g 28 (16-38) especies 41 (20-60) % exóticos H. <i>germanica</i> 32 (17-54) % C. <i>lobatulus</i> 17 (4-37) % A. <i>tepidá</i> 12 (8-17) % R. <i>irregularis</i> 10 (5-25) % Caparazones rellenos con pirita % arena: 53 Espesor: 2,93 m	AF 3: 8550 (2701-22644) caparazones/15g 33 (30-38) especies 61 (42-71) % exóticos R. <i>irregularis</i> 29 (16-39) % H. <i>germanica</i> 16 (9-28) % C. <i>lobatulus</i> 13 (7-19) % A. <i>tepidá</i> 11 (7-20) % Caparazones rellenos con pirita % arena: 51 Profundidad: 2,05 m

Tabla 3-2: Resumen de los resultados microfaunísticos. Los valores individuales representan la media y entre paréntesis aparecen los rangos.

APENDICE 3-A: Relación sistemática de especies de foraminíferos bentónicos identificadas en los sondeos de época industrial de la Ría de Bilbao.

1. CAPARAZÓN AGLUTINANTE

Arenoparrella mexicana (Kornfeld) = *Trochammina inflata* (Montagu) var. *mexicana* Kornfeld, 1931

Eggerelloides scaber (Williamson) = *Bulimina scabra* Williamson, 1858

Gaudryina rudis Wright, 1900

Haplofragmoides wilberti Andersen, 1953

Jadammina macrescens (Brady) = *Trochammina inflata* (Montagu) var. *macrescens* Brady, 1870

Spirorutilis wrightii (Silvestri) = *Spiroplecta wrightii* Silvestri, 1903

Textularia bocki Höglund, 1947

Textularia sp.

Textularia truncata Höglund, 1947

Tiphotrocha comprimata (Cushman & Brönniman) = *Trochammina comprimata* Cushman & Brönniman, 1948

Trochammina inflata (Montagu) = *Nautilus inflatus* Montagu, 1808

Trochammina ochracea (Williamson) = *Rotalina ochracea* Williamson, 1858

2. CAPARAZÓN PORCELANÁCEO

Adelosina cliarensis (Heron-Allen and Earland) = *Miliolina cliarensis* Heron-Allen and Earland, 1930

Adelosina laevigata d'Orbigny, 1826

Adelosina striata d'Orbigny, 1826

Adelosina sp.

Cornuspira involvens (Reuss) = *Operculina involvens* Reuss, 1850

Massilina secans (d'Orbigny) = *Quinqueloculina secans* d'Orbigny, 1826

Miliolinella striata (Montagu) = *Vermiculum striatum* Montagu, 1803

Miliolinella subrotunda (Montagu) = *Vermiculum subrotundum* Montagu, 1803

Pateoris hauerinoides (Rhumbler) = *Quinqueloculina subrotunda* (Montagu) var. *hauerinoides* Rhumbler, 1936

Quinqueloculina aspera d'Orbigny, 1826

Quinqueloculina auberiana d'Orbigny, 1839

Quinqueloculina berthelotiana d'Orbigny, 1839

Quinqueloculina bicornis (Walker and Jacob) =

Serpula bicornis Walker and Jacob, 1798

Quinqueloculina costata d'Orbigny, 1826

Quinqueloculina dimidiata Terquem, 1876

Quinqueloculina jugosa Cushman = *Quinqueloculina seminulum* (Linné) var. *jugosa* Cushman, 1944

Quinqueloculina lata Terquem, 1876

Quinqueloculina oblonga (Montagu) = *Vermiculum oblongum* Montagu, 1803

Quinqueloculina quadrata Nörvang, 1945

Quinqueloculina rugosa d'Orbigny, 1852

Quinqueloculina seminula (Linné) = *Serpula seminulum* Linné, 1758

Quinqueloculina sp.

Spiroloculina depressa d'Orbigny, 1826

Spiroloculina excavata d'Orbigny, 1846

Spiroloculina nitida d'Orbigny, 1826

Spiroloculina sp.

Spirorutilis wrightii (Silvestri) = *Spiroplecta wrightii* Silvestri, 1903

Triloculina bermudezi Acosta, 1940

Triloculina trigonula (Lamarck) = *Miliolites trigonula* Lamarck, 1804

3. CAPARAZÓN HALINO

Acervulina inhaerens Schultze, 1854

Acervulina sp.

Ammonia tepida (Linné) = *Rotalina tepida* (Linné) var. *tepida* Cushman, 1927

Astacolus crepidulus (Fichtel and Moll) = *Nautilus crepidula* Fichtel and Moll, 1978

Asterigerinata mamilla (Williamson) = *Rotalina mamilla* Williamson, 1858

Aubignyna hamblensis Murray, Whittaker and Alve, 2000

Bolivina pseudoplicata Heron-Allen and Earland, 1930

Bolivinellina pseudopunctata (Höglund) = *Bolivina pseudopunctata* Höglund, 1947

Brizalina britannica (Macfadyen) = *Bolivina britannica* Macfadyen, 1942

Brizalina difformis (Williamson) = *Textularia variabilis* Williamson var. *difformis* Williamson, 1858

Brizalina sp.

Brizalina spathulata (Williamson) = *Textularia variabilis* Williamson var. *spathulata* Williamson, 1858

Brizalina variabilis (Williamson) = *Textularia variabilis* Williamson var. *typica* Williamson, 1958

Bulimina alazanensis Cushman, 1927

- Bulimina elongata* d'Orbigny, 1846
Bulimina gibba Fornasini, 1902
Bulimina marginata d'Orbigny, 1826
Buliminella elegantissima (d'Orbigny) = *Bulimina elegantissima* d'Orbigny, 1839
Cancris auricula (Fichtel and Moll) = *Nautilus auricula* Fichtel and Moll, 1798
Cassidulina carinata (Silvestri) = *Cassidulina laevigata* d'Orbigny var. *carinata* Silvestri, 1896
Cassidulina obtusa Williamson, 1858
Cassidulina sp.
Cibicides lobatulus (Walker and Jacob) = *Nautilus lobatulus* Walker and Jacob, 1798
Cibicides sp.
Criboelphidium excavatum (Terquem) = *Polystomella excavata* Terquem, 1875
Criboelphidium gerthi (Van Voorthuysen) = *Elphidium gerthi* Van Voorthuysen, 1957
Criboelphidium oceanensis (d'Orbigny) = *Polystomella oceanensis* d'Orbigny, 1826
Criboelphidium williamsoni (Haynes) = *Elphidium williamsoni* Haynes, 1973
Elphidium crispum (Linné) = *Nautilus crispus* Linné, 1758
Elphidium earlandi Cushman, 1936
Elphidium incertum (Williamson) = *Polystomella umbilicatula* var. *incerta* Williamson, 1858
Elphidium macellum (Fichtel and Moll) = *Nautilus macellum* Fichtel and Moll, 1798
Elphidium magellanicum Heron-Allen and Earland, 1932
Elphidium margaritaceum (Cushman) = *Elphidium advenum* (Cushman) var. *margaritaceum* Cushman, 1930
Elphidium sp.
Epistominella vitrea Parker, 1953
Fissurina lucida (Williamson) = *Entosolenia marginata* (Montagu) var. *lucida* Williamson, 1848
Fissurina marginata (Montagu) = *Vermiculum marginatum* Montagu, 1803
Fissurina orbygniana Seguenza, 1862
Fissurina sp.
Florilus pauperatus (Balkwill and Wright) = *Nonionina pauperata* Balkwill and Wright, 1885
Gavelinopsis praegeri (Heron-Allen and Earland) = *Discorbina praegeri* Heron-Allen and Earland, 1913
Glabratella millettii (Wright) = *Discorbina millettii* Wright, 1911
Haynesina depressula (Walker and Jacob) = *Nautilus depressulus* Walker and Jacob, 1798
Haynesina germanica (Ehrenberg) = *Nonionina germanica* Ehrenberg, 1840
Haynesina sp.
Hyalinea balthica (Schröter) = *Nautilus balthicus* Schröter, 1783
Lagena clavata (d'Orbigny) = *Oolina clavata* d'Orbigny, 1846
Lagena laevis (Montagu) = *Vermiculum laeve* Montagu, 1803
Lagena perlucida (Montagu) = *Vermiculum perlucidum* Montagu, 1803
Lagena semistriata (Williamson) = *Lagena striata* (Walker) var. β , *semistriata* Williamson, 1848
Lagena striata (d'Orbigny) = *Oolina striata* d'Orbigny, 1839
Lagena sulcata (Walker and Jacob) = *Serpula sulcata* Walker and Jacob, 1798
Lamarckina haliotidea (Heron-Allen and Earland) = *Pulvinulina haliotidea* Heron-Allen and Earland, 1911
Lenticulina inortatus (d'Orbigny) = *Robulina inortata* d'Orbigny, 1846
Lenticulina sp.
Melonis pompilioides (Fichtel & Moll) = *Nautilus pompilioides* Fichtel & Moll, 1798
Nonionella atlantica Cushman, 1947
Oolina hexagona (Williamson) = *Entosolenia squamora* (Montagu) var. *hexagona* Williamson, 1848
Oolina melo d'Orbigny, 1839
Oolina squamosa (Montagu) = *Vermiculum squamosa* Montagu, 1803
Patellina corrugata Williamson, 1858
Planorbulina mediterranensis d'Orbigny, 1826
Rosalina anomala Terquem, 1875
Rosalina irregularis (Rhumbler) = *Discorbina irregularis* Rhumbler, 1906
Rosalina sp.
Spirillina vivipara Ehrenberg, 1843
Stainforthia fusiformis (Williamson) = *Bulimina pupoides* d'Orbigny var. *fusiformis* Williamson, 1858
Svartkina sp.
Trifarina angulosa (Williamson) = *Uvigerina angulosa* Williamson, 1958
Trifarina bradyi Cushman, 1923
Uvigerina compressa Cushman, 1926
Uvigerina peregrina Cushman, 1923
Uvigerina pygmaea d'Orbigny, 1826

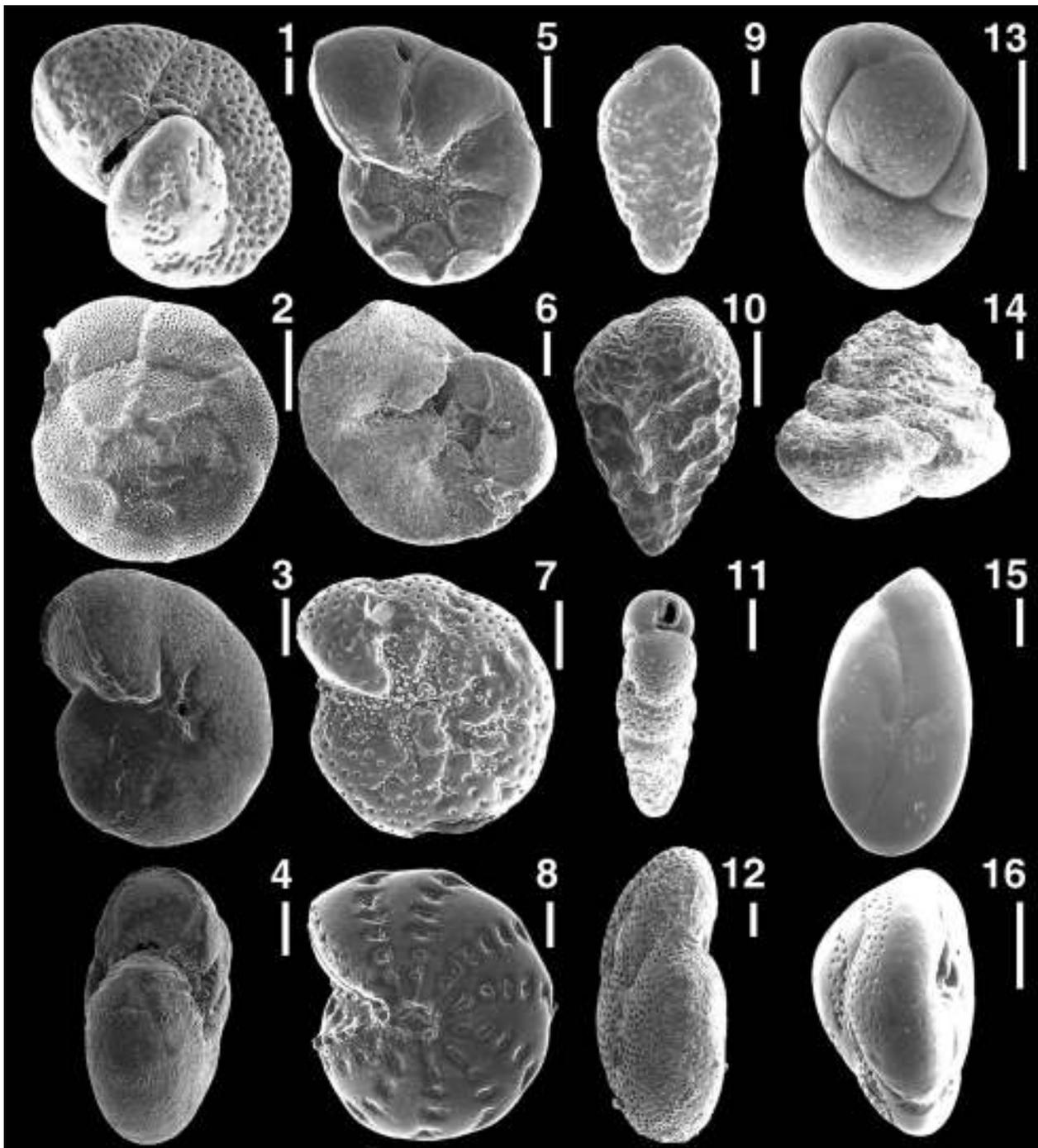


Lámina 3-1: Especies dominantes de foraminíferos bentónicos encontradas en los sondeos perforados en sedimentos de edad industrial de la Ría de Bilbao. La barra de escala indica 0,05 mm.

- | | |
|--|--|
| 1 - <i>Cibicides lobatulus</i> (Walker and Jacob, 1798), sondeo PCE-AF 2. | 9 - <i>Brizalina britannica</i> (Macfadyen, 1942), sondeo PCGa-AF 1. |
| 2 - <i>Ammonia tepida</i> (Linné, 1758), sondeo PCGb-AF 1. | 10 - <i>Bolivina pseudoplicata</i> Heron-Allen and Earland, 1930, sondeo PCE-AF 2. |
| 3 - <i>Haynesina germanica</i> (Ehrenberg, 1840), sondeo PCZ-AF 2. | 11 - <i>Brizalina variabilis</i> (Williamson, 1958), sondeo PCGa-AF 2. |
| 4 - <i>Haynesina germanica</i> (Ehrenberg, 1840), sondeo PCZ-AF 2. | 12 - <i>Rosalina anomala</i> Terquem, 1875, sondeo PCE-AF 2. |
| 5 - <i>Haynesina depressula</i> (Walker and Jacob, 1798), sondeo PCZ-AF 2. | 13 - <i>Cassidulina obtusa</i> Williamson, 1858, sondeo PCE-AF 2. |
| 6 - <i>Rosalina irregularis</i> (Rhumbler, 1906), sondeo PCE-AF 2. | 14 - <i>Textularia truncata</i> Höglund, 1947, sondeo PCE-AF 2. |
| 7 - <i>Criboelphidium oceanensis</i> (d'Orbigny, 1826), sondeo PCZ-AF 1. | 15 - <i>Quinqueloculina seminulum</i> (Linné, 1758), sondeo PCGb-AF 1. |
| 8 - <i>Criboelphidium williamsoni</i> Haynes, 1973, sondeo PCE-AF 1. | 16 - <i>Asterigerinata mamilla</i> (Williamson, 1858), sondeo PCGb-AF 1. |



4. Situación reciente (últimos 50 años)



La crisis económica de finales del s. XX condujo al desmantelamiento de la mayor parte de la estructura industrial en el entorno de la Ría de Bilbao.

4.1. Introducción

La Ría de Bilbao es el estuario más contaminado del litoral cantábrico. Durante las últimas décadas, sin embargo, se ha producido un descenso significativo en los vertidos de contaminantes debido a la implementación de políticas de protección medioambiental, al desarrollo de sistemas de tratamiento de los vertidos y al cierre de las fábricas más importantes durante los últimos años de recesión económica (Gorostiaga y Díez, 1996). Además, actualmente la regeneración ambiental de este estuario se está acometiendo como parte del denominado Plan Estratégico para la Revitalización del Bilbao Metropolitano (Autoridad Portuaria de Bilbao, 1999-2000).

El principal objetivo de este capítulo es el conocimiento de la situación actual de la Ría de Bilbao en términos ambientales mediante el estudio de la distribución y abundancia de los foraminíferos bentónicos, con el apoyo de análisis geoquímicos de metales pesados, presentes en muestras superficiales y pequeños testigos recogidos en las llanuras intermareales altamente contaminadas de este estuario. Además, estos resultados permiten reconstruir la historia más reciente del impacto antrópico sobre la Ría de Bilbao, tal y como aparece registrado en sus sedimentos, y también contribuyen a crear una red de muestreo que nos ayude a evaluar en un futuro el progreso de su regeneración ambiental (ver Capítulo 5). Por otra parte, se han realizado análisis de Pb-210 y Cs-137 con la intención de asignar una cronología a los aportes contaminantes y a los cambios ambientales detectados.

4.2. Materiales y Métodos

4.2.a) Muestras superficiales

Con una periodicidad estacional se tomaron muestras superficiales para su análisis micropaleontológico en Octubre 1997, Enero y Abril 1998 en 13 estaciones intermareales a lo largo del estuario y 1 localidad en la bahía (Figura 4-1). 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. Como se describe en el apartado 1.1.c, 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 igual cantidad de etanol, obteniendo 80 cm² de muestra. En el laboratorio, el contenido del recipiente fue tratado siguiendo el proceso descrito en el apartado 1.1.c. Debido al reducido número de foraminíferos presente en estas muestras, todos los caparazones existentes fueron recogidos en sus correspondientes celdillas, ordenados y clasificados con un microscopio estereoscópico binocular de luz reflejada. En total, fueron estudiadas 32 muestras y aproximadamente 2000 foraminíferos.

Por su parte, las muestras utilizadas para los análisis geoquímicos fueron recogidas simultáneamente con las destinadas al análisis micropaleontológico en Octubre 1997 y numeradas correlativamente, de tal manera que la comparación entre ambos indicadores fuera lo más precisa posible. Los procedimientos y técnicas utilizadas para su análisis aparecen descritos en Cearreta *et al.* (2000). Los análisis realizados sobre los sedimentos incluyen los metales pesados y el As. Los resúmenes estadísticos para el Fe, Mn, Ti, Zn, Pb, Cu, Ni, Cr y el As en los sedimentos superficiales y en los pequeños testigos se presentan en la Tabla 4-1, incluida en Cearreta *et al.* (2000).

4.2.b) Pequeños testigos

Con el objeto de estudiar la historia más reciente de este estuario, tres pequeños testigos de 50 cm de longitud fueron tomados en sendas zonas intermareales de la Ría de Bilbao en Noviembre 1997 (Figura 4-1). 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 estación de muestreo con el fin de obtener material suficiente para analizar los siguientes parámetros: foraminíferos bentónicos, metales pesados, radionucleidos Cs-137 y Pb-210 y esteroides fecales. Los foraminíferos bentónicos forman la base del presente estudio, complementado con los datos obtenidos de los análisis de metales pesados y los radionucleidos Cs-137 y Pb-210, mientras que los resultados de esteroides fecales no fueron satisfactorios y 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

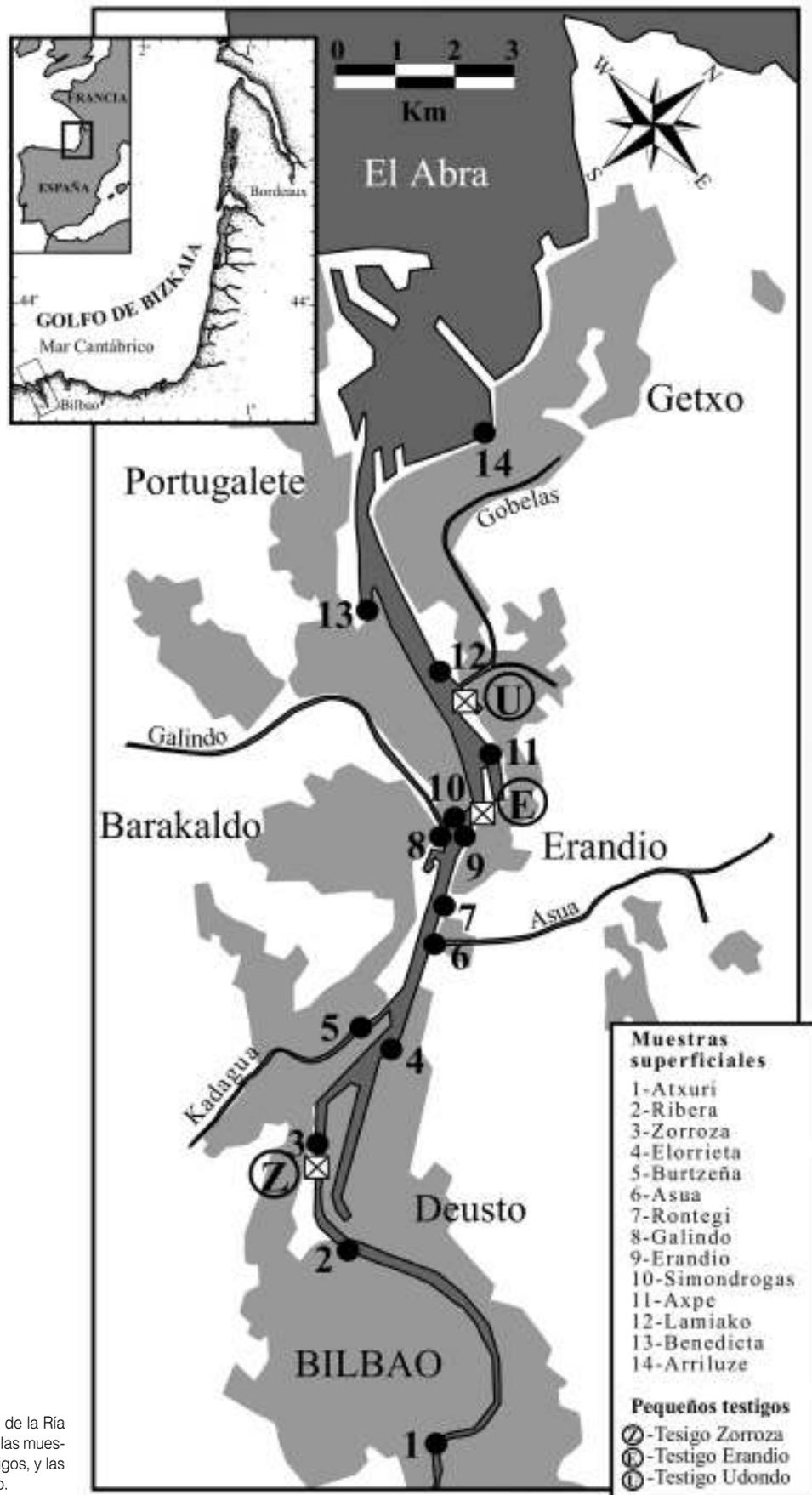


Figura 4-1: Localización geográfica de la Ría de Bilbao, mostrando la posición de las muestras superficiales, los pequeños testigos, y las localidades mencionadas en el texto.

actividad biológica dentro de los sedimentos. Posteriormente, los tubos fueron seccionados longitudinalmente y el sedimento dividido a intervalos de 1 cm de grosor para su análisis. Una de las cuatro mitades así obtenida fue descrita, fotografiada, radiografiada con el fin de detectar cualquier estructura interna (laminación, bioturbación), y subdividida 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 concentraciones 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 un contenido variable en arena.

Las muestras destinadas al análisis micropaleontológico 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 proporción de arena y fango. Observaciones previas de la fracción arenosa en 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 en el 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 3 muestras cada 5 cm. Posteriormente, aquellos intervalos que mostraron variaciones en su contenido de foraminíferos fueron analizados a cada cm, excepto un pequeño número de muestras que presentaban un abundante contenido en caparazones y donde fue posible extraer inicialmente al menos 300 individuos. El escaso número de foraminíferos encontrado en la mayor parte de las muestras hizo necesario recoger en éstas todos los caparazones disponibles. Fueron ordenados en sus celdillas correspondientes e identificados con un microscopio estereoscópico binocular de luz reflejada. En conjunto, se estudiaron 84 muestras y más de 5600 foraminíferos en estos testigos. El listado de todas las especies encontradas en este capítulo se presenta en el Apéndice 4-A.

4.3.Resultados

4.3.a) 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: las asociaciones vivas que se consideran en equilibrio con su medio, y las asociaciones muertas que han sido formadas a lo largo del tiempo a partir de las asociaciones vivas mediante la producción y muerte de los individuos, modificadas posteriormente por procesos post *mortem*.

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 las muestras superficiales de 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 0 individuos en la totalidad del estuario superior en cualquier época del año (Figura 4-2), 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). Se puede considerar que cualquier zona estuarina está soportando en cada 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; Figura 4-1) no se han encontrado foraminíferos vivos durante todo el periodo de estudio (Figura 4-3). Sin embargo, en la zona estuarina media (muestras 6-10), aunque los valores de abundancia observados fueron extremadamente bajos (desde 5 individuos en la muestra 7-Abril 1998 hasta 0 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 0 individuos en la muestra 11- Octubre 1997, 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 parte 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 conforme entra en el estuario (Figura 4-3).



Figura 4-2: Muestreo superficial en La Ribera (zona superior del estuario).

Durante el periodo de muestreo se encontraron 10 especies diferentes de foraminíferos bentónicos viviendo en el estuario, aunque el máximo número de especies encontradas contemporáneamente en cada estación de muestreo fue 8. 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 una muestra y en un mismo momento. Las especies más recurrentes encontradas en el estuario fueron *Brizalina spathulata*, *A. tepida* y *B. 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, la más inferior (Figura 4-4), presentó la mayor abundancia y diversidad del estuario, aunque no se encontraron nunca más de 18 individuos vivos de 8 especies diferentes en el mismo momento (Enero 1998). Las especies más abundantes aquí, *H. germanica* y *Q. seminula*, estaban representadas por un máximo de 8 individuos, *B. spathulata* estaba presente con 4 individuos, y el resto de las especies vivas tenían sólo 1 ó 2 individuos.

En la bahía, la muestra 14 (Figura 4-5) mostró mayor diversidad y abundancia que cualquiera de las muestras estuarinas, aunque los valores obtenidos son mucho más bajos de lo que cabría esperar para un medio de este tipo en condiciones normales y sin contaminación (Cearreta, 1988; Murray, 1991). 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. tepida* (máximo 41 individuos-Enero 1998), *Q. seminula* (máximo 13 individuos-Enero 1998), *C. lobatulus* (máximo 8 individuos-Enero 1998) y *R. anomala* (máximo 3 individuos-Enero 1998). El resto de las especies se encontraron presentes sólo con 1 ó 2 especímenes. Por otra parte, esta zona de muestreo contenía todas las especies diferentes que aparecieron en las muestras estuarinas, lo que parece indicar que la bahía es el área fuente para las microfaunas de foraminíferos que se encuentran en el estuario, excepto para los escasos individuos de las especies marismañas *T. inflata* y *J. macrescens*, que probablemente proceden de los afluentes que descargan en el estuario (Figura 4-1).

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 periodo de tiempo y, en consecuencia, reflejan los efectos acumulativos de la producción anual de las diferentes

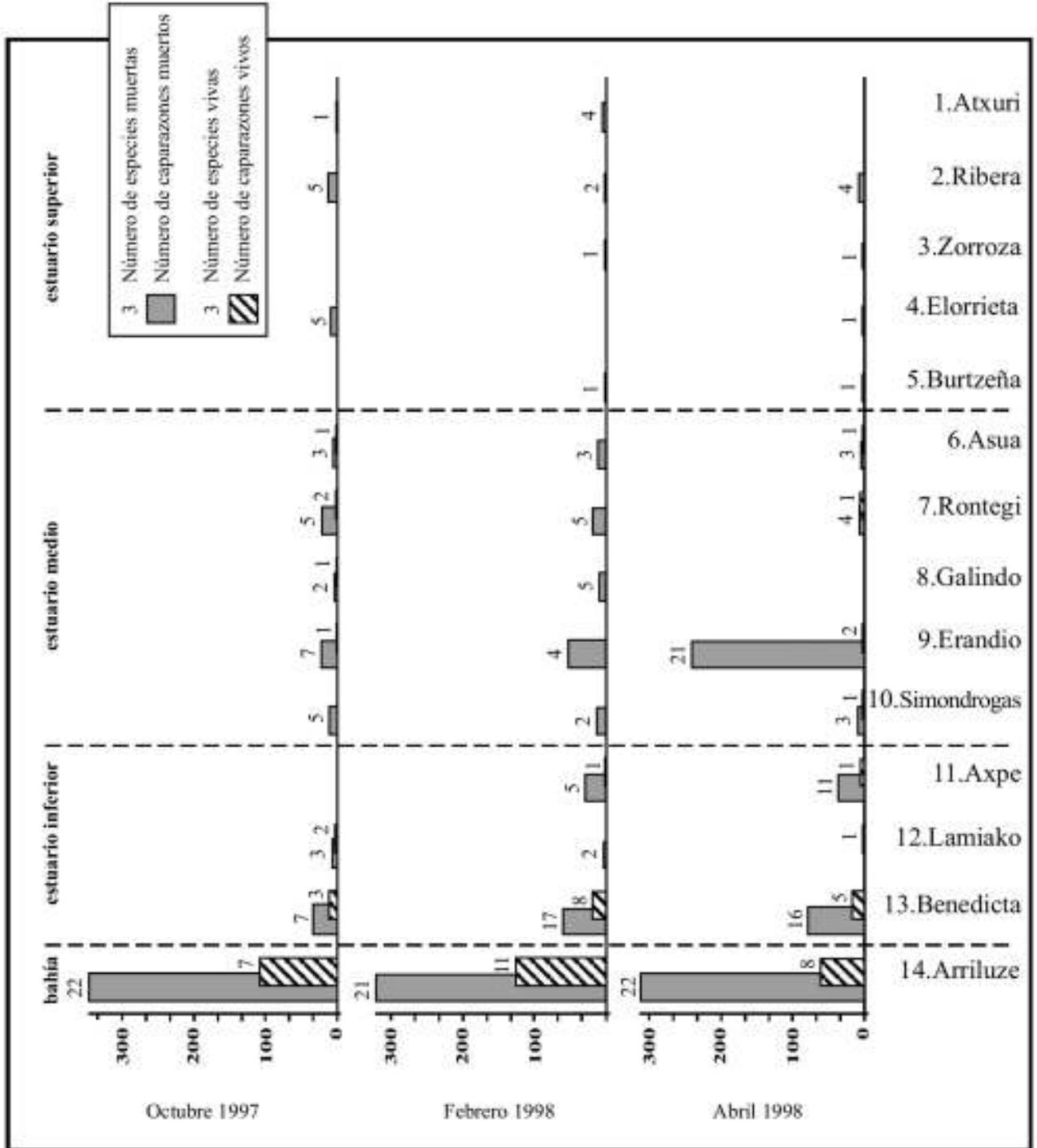


Figura 4-3: Abundancia de foraminíferos vivos y muertos en las muestras de sedimento superficial a lo largo de la Ría de Bilbao.



Figura 4-4: Zona de muestreo superficial de la Benedicta en Sestao (muestra 13). Se trata de la muestra más próxima a la desembocadura obtenida dentro del estuario, aunque hoy en día ha desaparecido por la rehabilitación urbanística de esta zona.



Figura 4-5: Zona de muestreo superficial de Arriluze en Getxo (muestra 14). Esta muestra está situada en la bahía de El Abra, fuera del estuario.

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 para explicar 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, al comportarse éstos como partículas de sedimento (Figura 4-3).

Este movimiento incluye especies pequeñas transportadas en suspensión, como *B. spathulata* y *Buliminella elegantissima*, además de caparazones robustos transportados como carga de lecho, por ejemplo *T. truncata* y *C. lobatulus*.

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 individuos y presentan también una mayor diversidad específica que las asociaciones vivas. El número medio de especies muertas por muestra en el estuario es de 4, mientras que la diversidad media de las asociaciones vivas es menor de 1. La muestra con mayor diversidad en el estuario es la muestra 13 (Figura 4-4) con un máximo de 17 especies diferentes. En la bahía, la muestra 14 (Figura 4-5) 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 1, 0 y 2 individuos respectivamente (Figura 4-3).

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. tepida* 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 caparazones por muestra). El resto de las especies aparecen esporádicamente en algunas muestras y siempre con 1 ó 2 individuos solamente.

Las muestras de sedimento superficial también contienen otros organismos como las tecamebas, más comunes en el estuario superior y medio, lugares donde descargan los afluentes fluviales, y algunos ostrácodos, foraminíferos planctónicos y pequeños moluscos.

Al igual que ocurre con los resultados obtenidos de los análisis micropaleontológicos, las concentraciones de metales pesados en las muestras superficiales de la Ría de Bilbao muestran una variabilidad considerable (Figura 4-6), incluso cuando han sido muestreadas en puntos adyacentes. De hecho, las variaciones observadas para el Ti y el As son de varios órdenes de magnitud. Por otra parte, los valores extremadamente altos en comparación con los valores de fondo para Zn, Pb, Cu, Cr y As (como se deduce de los sedimentos preindustriales, Tabla 4-1), reflejan el severo deterioro ambiental de este área causado por los vertidos de contaminantes urbanos e industriales (Cearreta *et al*, 2000).

Las distribuciones espaciales de Fe, Zn, Pb, Cu y Ni son muy similares entre sí, encontrando las mayores concentraciones en el estuario medio, particularmente en la muestra 8 situada en la ría de Galindo (Figura 4-1). Esta distribución de los metales pesados no presenta asociación con el Al, indicando que los incrementos observados no están relacionados con un aumento en el contenido en arcilla (Figura 4-6). Los enriquecimientos encontrados en las muestras superficiales de este capítulo, son similares a los descritos en otros trabajos para este estuario (Seebold *et al.*, 1982; Ruiz de la Rosa y Sáiz-Salinas, 1992; Irabien, 1992; Sáiz-Salinas, 1997). La distribución en los sedimentos superficiales de los metales pesados observada en este trabajo es coherente con el vertido de los efluentes (y posterior depósito de estos metales pesados) por parte de las empresas metalúrgicas y de pinturas en las zonas media e inferior del estuario y en las

zonas inferiores de los principales afluentes (Cearreta *et al.*, 2000).

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 mineros, 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 hacen 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 a una o dos especies a expensas de las demás, presentando un gradiente a partir de la fuente de nutrientes. Sin embargo, un suministro excesivo de materia orgánica provoca el colapso de la comunidad bentónica debido probablemente a un bajo contenido en oxígeno y pH (Alve, 1995).

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 periodo 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 habitats bajo condiciones deficientes de oxígeno y durante largos periodos de tiempo también están presentes (aunque no necesariamente como especies dominantes) en ambientes comparables bajo condiciones oxigenadas. 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 desde el Abra, serán entonces capaces de colonizar con éxito el estuario, ya que se encuentran particularmente adaptadas a desarrollarse en condiciones naturales de estrés ambiental.

4.3.b) Pequeños testigos

Las muestras superficiales aportan información general sobre las características microfaunísticas y geoquímicas actuales de la Ría de Bilbao. Sin embargo, no muestran cómo esas características han ido cambiando a lo largo del tiempo en respuesta al desarrollo urbano e industrial reciente de esta zona costera.

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 (Figura 4-1) con el fin de determinar el grado de cambio ambiental experimentado en tiempos recientes, tal y como aparece indicado por la evolución vertical de las asociaciones enterradas de foraminíferos. Estos testigos (de 50 cm de longitud) han sido analizados en secciones de 1 cm de grosor, completando el estudio de este capítulo con un análisis más exhaustivo que permita determinar la evolución ambiental más reciente de este estuario.

Testigo Zorroza. Este pequeño testigo se obtuvo en una llanura intermareal de la parte alta del estuario (Figura 4-1). Su radiografía muestra un sedimento finamente laminado, sin bioturbación visible, con una posible superficie de erosión a 22 cm de profundidad (Figuras 4-7 y 4-8).

El número de foraminíferos bentónicos que aparecen en este testigo es extremadamente pequeño. En total, sólo 103 caparazones de foraminíferos se encontraron en las 25 muestras analizadas. Los resultados de este estudio micropaleontológico, que aparecen en la Figura 4-17, 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 indivi-

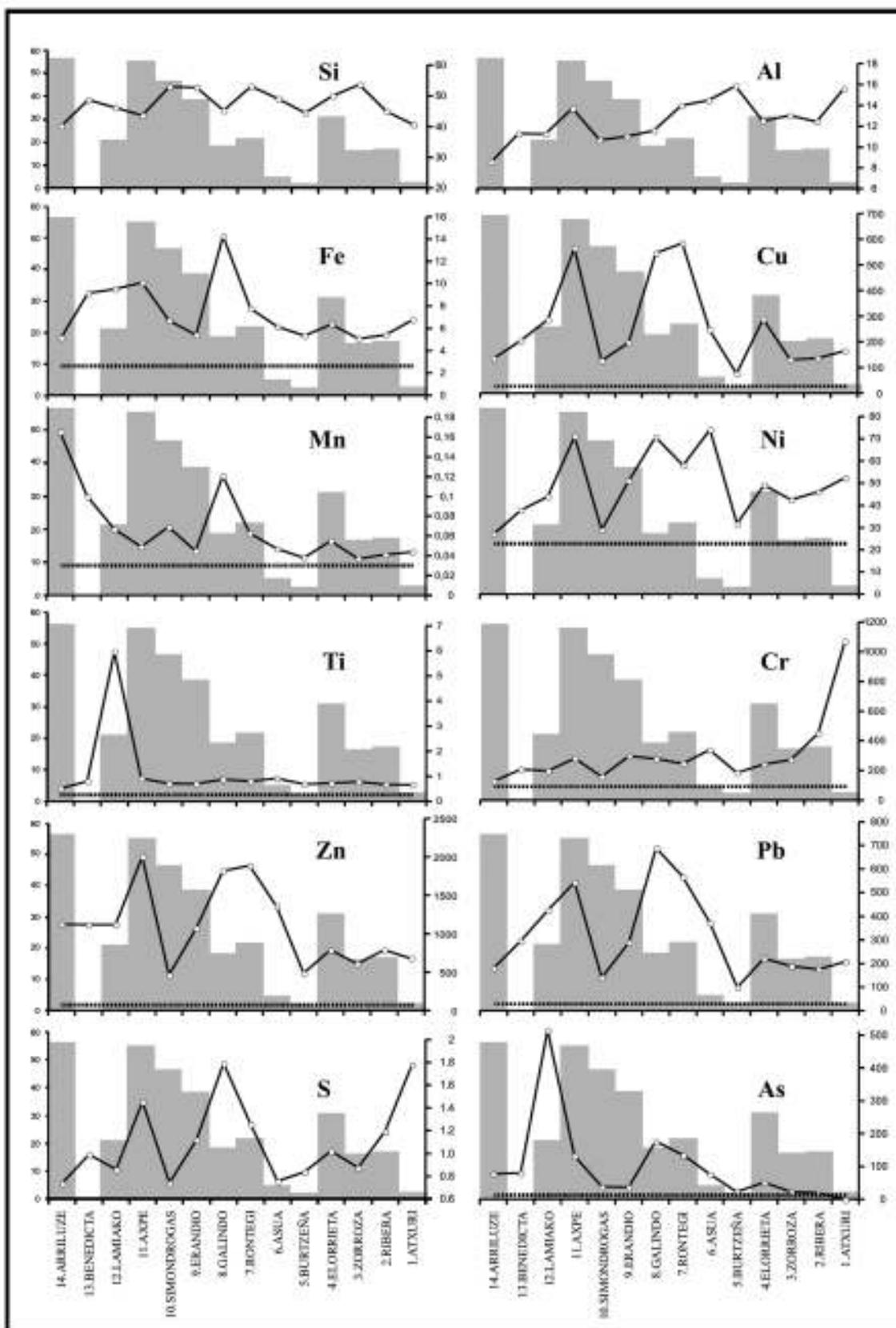


Figura 4-6: Concentraciones de elementos químicos en las muestras superficiales de la Ría de Bilbao (elementos principales en % de peso y elementos traza en mg/kg). La línea horizontal punteada representa el fondo geoquímico pre-industrial, determinado a partir del análisis de los sondeos holocenos. Las zonas sombreadas representan el contenido en arena (%).



Figura 4-7: Sección longitudinal del testigo obtenido en Zorroza.

duos 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 5. 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 (Apéndice 4-1) pero sólo *A. tepida* y

H. germanica aparecen comúnmente en todo el registro. La asociación característica del intervalo 25-27 está constituida por *A. tepida* (máximo 19 caparazones en la muestra 25), *H. germanica* (máximo 7 caparazones en la muestra 26) y *C. excavatum* (máximo 4 caparazones en la muestra 25). El resto de las especies aparece esporádicamente en las muestras y nunca lo hacen con más de 2 individuos. Como hemos visto anteriormente, hoy en día no se encuentran especies vivas en la zona superior del estuario y, como vimos en el Capítulo 3, probablemente ha sido así durante el periodo industrial reciente (años 1950-2000, Figuras 3-4 y 3-15). 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. Casi todas las muestras analizadas contenían tecamebas que, en general, eran más abundantes que los foraminíferos bentónicos.

Las concentraciones de la mayoría de los metales pesados en este sondeo son inferiores a las encontradas en los otros dos sondeos situados corriente abajo (Tabla 4-1 y Figuras 4-9, 4-12 y 4-16). En cualquier caso, las concentraciones para el Zn, Pb y Cu son significativamente mayores que las calculadas para los sedimentos locales pre-industriales (Tablas 4-1 y 3-1 y Figura 4-9).

Las distribuciones del Cs-137 y del Pb-210 en la vertical son bastante erráticas (Figura 4-8). El Cs-137, el Pb-210 y el K-40 presentan perfiles similares, a pesar de que sus orígenes son diferentes. Este hecho indica que la distribución vertical para estos elementos no se corresponde con el perfil típico de evolución, sino que esta distribución está controlada por el retrabajamiento de las partículas. El hecho de que no se reflejen estos perfiles típicos se debe a que el depósito no se corresponde a un proceso continuo sino que es el resultado de la frecuente alteración humana mediante el dragado y la navegación, responsables de la naturaleza fragmentaria de este registro. La distribución errática de los radionucleidos y la naturaleza fragmentaria del registro impiden datar estos sedimentos. Sin embargo, es posible obtener alguna información utilizando la distribución del Cs-137. Apesar de que no presenta picos de actividad relacionados con los ensayos de armas nucleares en la atmósfera en 1963 ni con el accidente nuclear de Chernobil en 1986, la actividad del Cs-137 muestra un claro descenso más allá del límite de detección por debajo de 29 cm de profundidad.

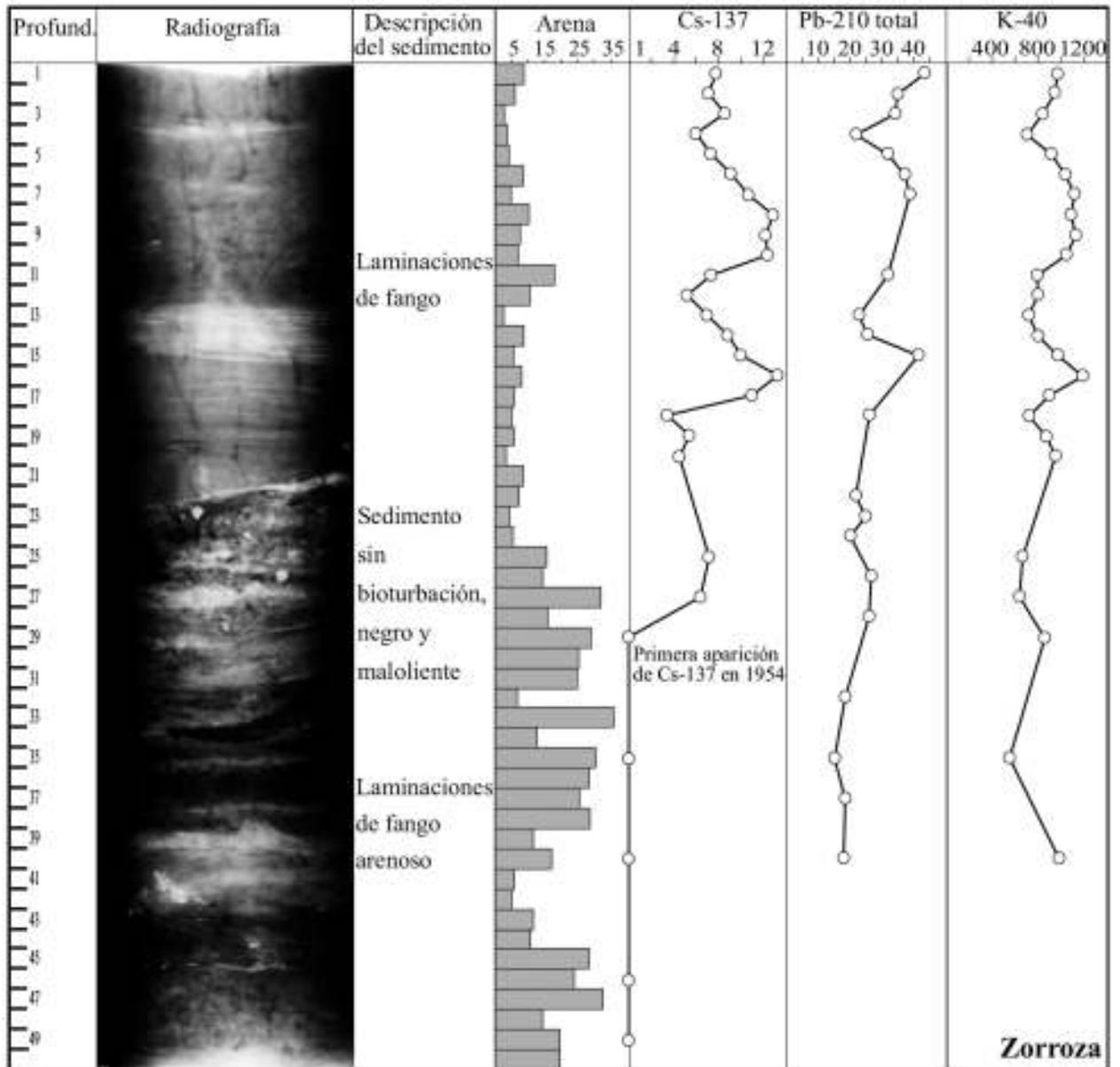


Figura 4-8: Imagen de rayos -X, contenido en arena (%), y actividad de Cs-137, Pb-210 y K-40 (Bq/kg) con la profundidad (cm) en el testigo Zorroza (Ría de Bilbao).

Considerando que la primera aparición de Cs-137 se produce en el año 1954 (DeLaune *et al.*, 1978), podemos asumir que los 29 cm superiores se han depositado con posterioridad a esta fecha (velocidad media de acreción de 7 mm año⁻¹). Por otra parte, si comparamos los datos aquí obtenidos para el Pb-210 con los encontrados por Cearreta *et al.* (2002b) en la ría de Plentzia, se puede deducir que la acreción de los 50 cm de sedimento muestreado en este testigo se han depositado en menos de 120 años (Cearreta *et al.*, 2000).

Testigo Erandio. Esta secuencia sedimentaria se obtuvo en una llanura intermareal situada en la

parte media del estuario (Figura 4-1). La estructura interna de este testigo consiste en laminaciones de fango arenoso y arena fangosa, con una superficie erosiva oblicua entre 23 y 28 cm de profundidad (Figuras 4-10 y 4-11). Este testigo se puede dividir en dos partes diferenciadas debido a sus características texturales: las muestras por debajo de la superficie erosiva son arenosas (>85 % de arena), mientras que los sedimentos por encima de ella son principalmente de grano fino (<35 % de arena).

El contenido en foraminíferos bentónicos de esta secuencia es muy diferente entre las mitades superior e inferior del testigo, a ambos lados de la superficie erosiva (Figura 4-17). Por encima de esta superficie,

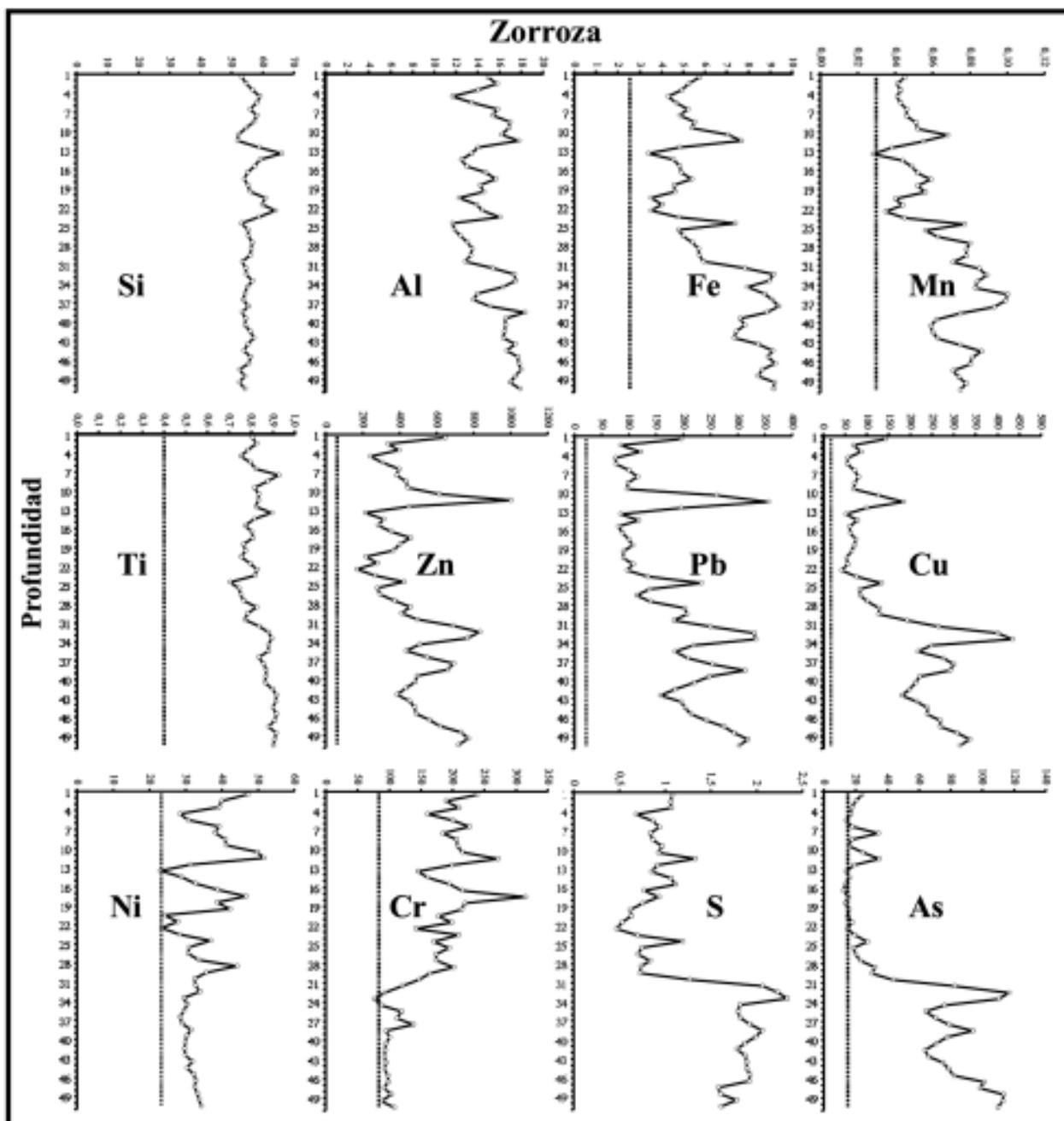


Figura 4-9: Concentraciones de elementos químicos con la profundidad (cm) en el testigo Zorroza (Ría de Bilbao). La línea vertical punteada representa el fondo geoquímico pre-industrial determinado en los sondeos holocenos. Los elementos principales en % de peso y los elementos traza en mg/kg.

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 1 (41 individuos) y la 10 (89 individuos), el resto contienen menos de 28 caparazones, con una media de 11 caparazones por 50 g de sedi-

mento 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 4648 caparazones de foraminíferos en las 33 muestras analizadas de este testigo.

Se identificaron 59 especies diferentes (Apéndice 4-A) pero las asociaciones están fuertemente domi-

nadas sólo por *A. tepida* (media 42,4%), *C. lobatulus* (media 22,5%) y *H. germanica* (media 18,5%) que, en conjunto, constituyen aproximadamente el 85% de la asociación característica. Las especies secundarias son *R. anomala* (media 2,8%), *C. williamsoni* (media 2,7%), *C. excavatum* (media 2,4%), *R. irregularis* (media 1,9%) y *E. crispum* (media 0,8%).

Esta asociación de foraminíferos puede ser encontrada a lo largo de toda la secuencia sedimentaria, independientemente de la gran variación en la abundancia de individuos que existe entre las zonas superior e inferior del testigo. Las muestras con

menos de 100 individuos no se han usado para los cálculos. El índice de diversidad α (apartado 1.1.b) oscila entre 3 y 6 con un valor medio de 4. La composición química media de los caparzones en las asociaciones es 96% hialinos, 3% porcelanáceos, y 1% aglutinantes. En diferentes muestras a lo largo del testigo se encontraron ostrácodos en bajo número, apareciendo de forma esporádica también foraminíferos planctónicos y tecamebas.

Las diferencias observadas en las características sedimentarias y en la abundancia microfauística entre las partes inferior y superior de este sondeo

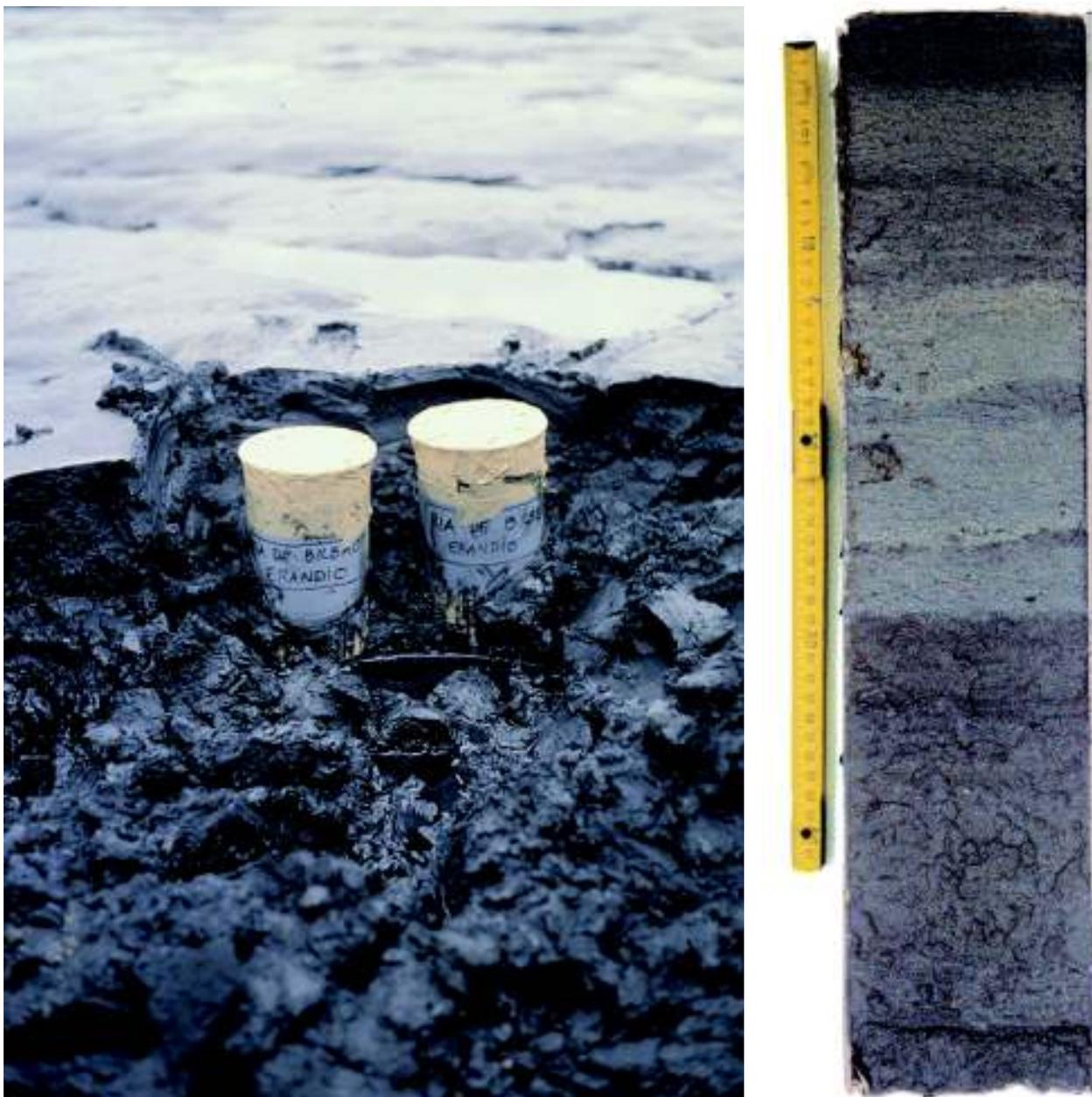


Figura 4-10 (izquierda): Los dos pequeños tubos de PVC introducidos en el fango del punto de muestreo en Erandio. **(derecha):** Sección longitudinal del testigo obtenido.

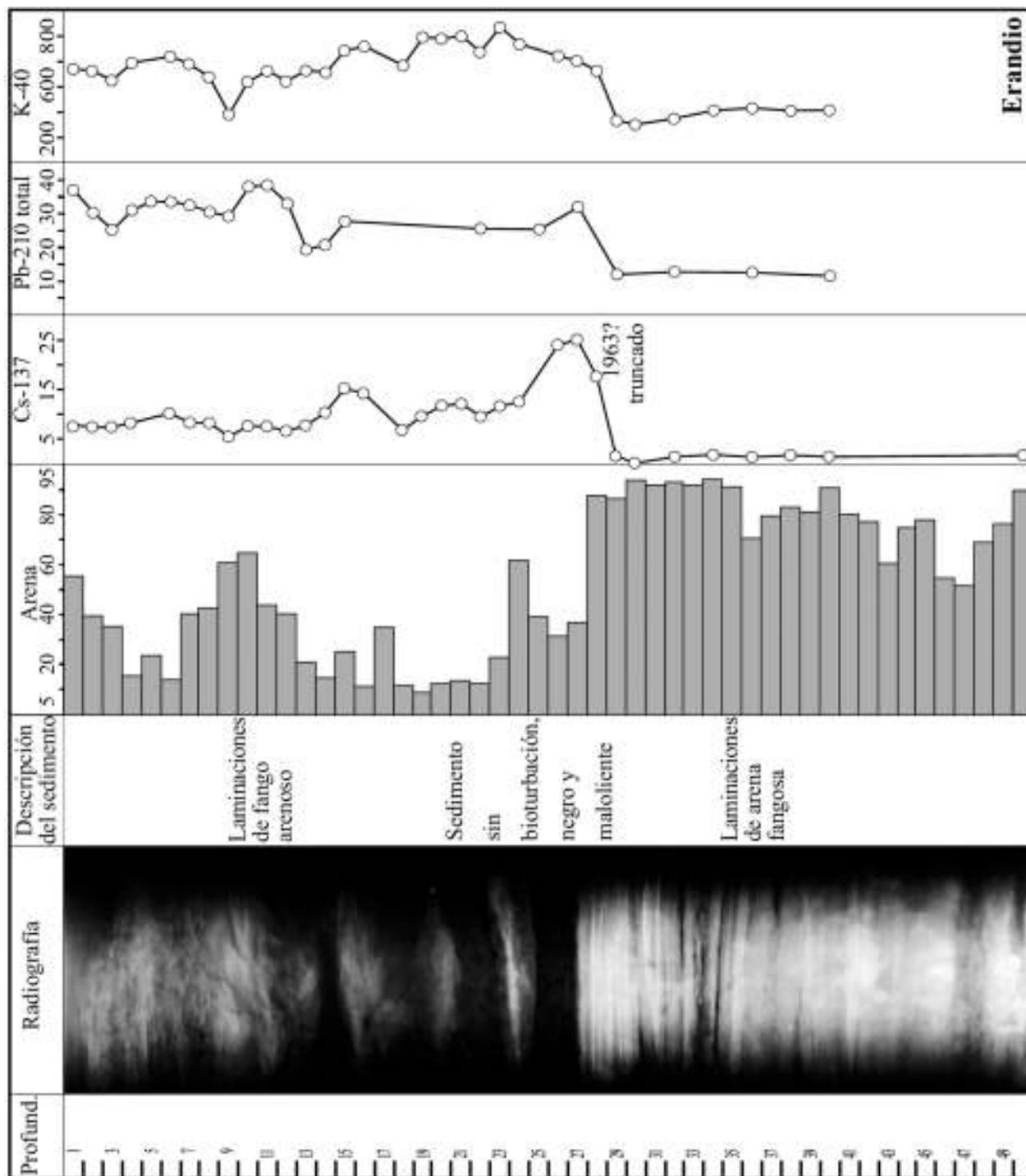


Figura 4-11: Imagen de rayos -X, contenido en arena (%), y actividad de Cs-137, Pb-210 y K-40 (Bq/kg) con la profundidad (cm) en el testigo de Erandio (Ría de Bilbao).

podrían deberse a la construcción de un rompeolas y un dique sumergido durante los años 70 (siglo XX) en El Abra. Los dragados asociados a estos proyectos podrían haber removilizado los sedimentos, mientras que la modificación en el régimen de la corriente y la energía del medio pro-

vocadas por esta construcción, podrían haber permitido un incremento en el depósito de material de grano fino (como se observa en la parte superior del sondeo). Una variación similar en el tipo de sedimentación también ha sido descrita para El Abra (ITSEMAP, 1990) aunque, sin un control más

preciso de las dataciones, esta interpretación es sólo una hipótesis.

Desde el punto de vista geoquímico (Figura 4-12), la capa inferior de grano grueso presenta concentraciones significativamente más altas de algunos metales (Fe, Mn, Pb, Cu, Zn y As) que la parte superior del sondeo. Este incremento en las concentraciones parece deberse a la presencia de partículas detríticas gruesas, ricas en metales pesados, que reflejan las actividades locales de minería

y industria del metal. El análisis bajo microscopio electrónico de barrido de estos materiales muestra numerosas partículas antropogénicas de tamaño arena como los productos derivados de las fundiciones (Figura 4-13A), los granos constituidos por partículas ricas en metal (5-40 micras de tamaño de grano) contenidas en una matriz de silicato (Figura 4-13B) y los productos residuales ricos en S y metales asociados como el Fe, Cr y Zn (Figura 4-13C) (Cearreta *et al.*, 2000).

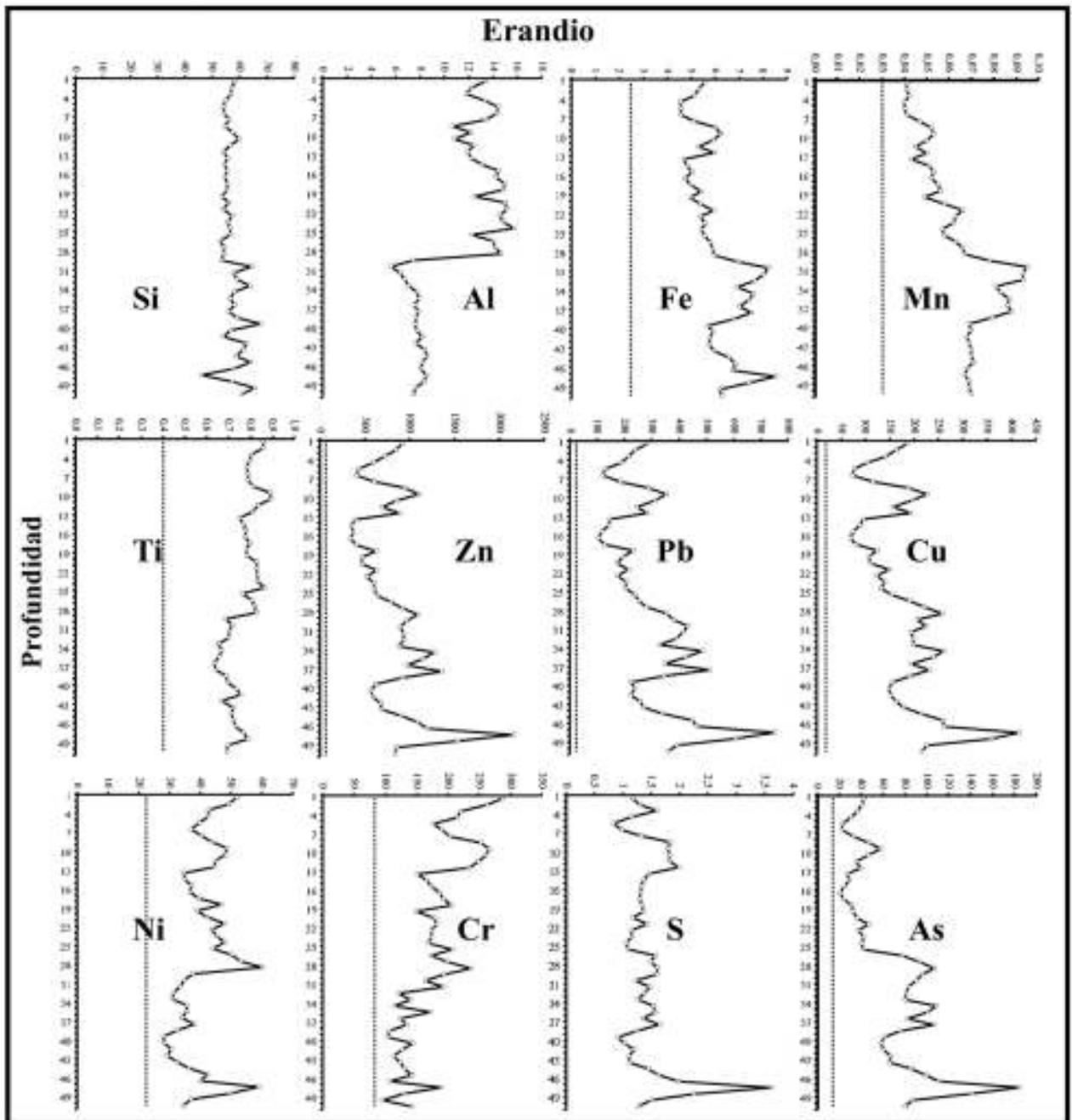


Figura 4-12: Concentraciones de elementos químicos con la profundidad (cm) en el testigo Erandio (Ría de Bilbao). La línea vertical punteada representa el fondo geoquímico pre-industrial determinado en los sondeos holocenos. Los elementos principales en % de peso y los elementos traza en mg/kg.

La actividad del Cs-137 y del Pb-210 muestra también un marcado detrimento por debajo de la superficie de erosión. Este descenso del Cs-137 a niveles extremadamente bajos por debajo de la superficie de erosión sugiere que los sedimentos han sido removidos después del año 1954. El gran incremento encontrado a 26 cm de profundidad podría responder al máximo de las pruebas de armas atómicas en la atmósfera correspondiente al año 1963. Los sedimentos más gruesos presentes debajo de esta superficie erosiva serían más antiguos, pero no pueden ser datados con la información disponible actualmente.

Testigo Udondo. Este sondeo se obtuvo en una llanura intermareal dentro de la dársena de Udondo en el estuario inferior (Figuras 4-1 y 4-14). El testigo presenta una laminación bien marcada en toda su longitud (Figura 4-15).

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 testigo, 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 (Figura 4-17).

Treinta y seis especies diferentes (Apéndice 4-A) aparecieron en este testigo, pero solamente *A. tepida*, *H. germanica* y *C. lobatulus* son especies

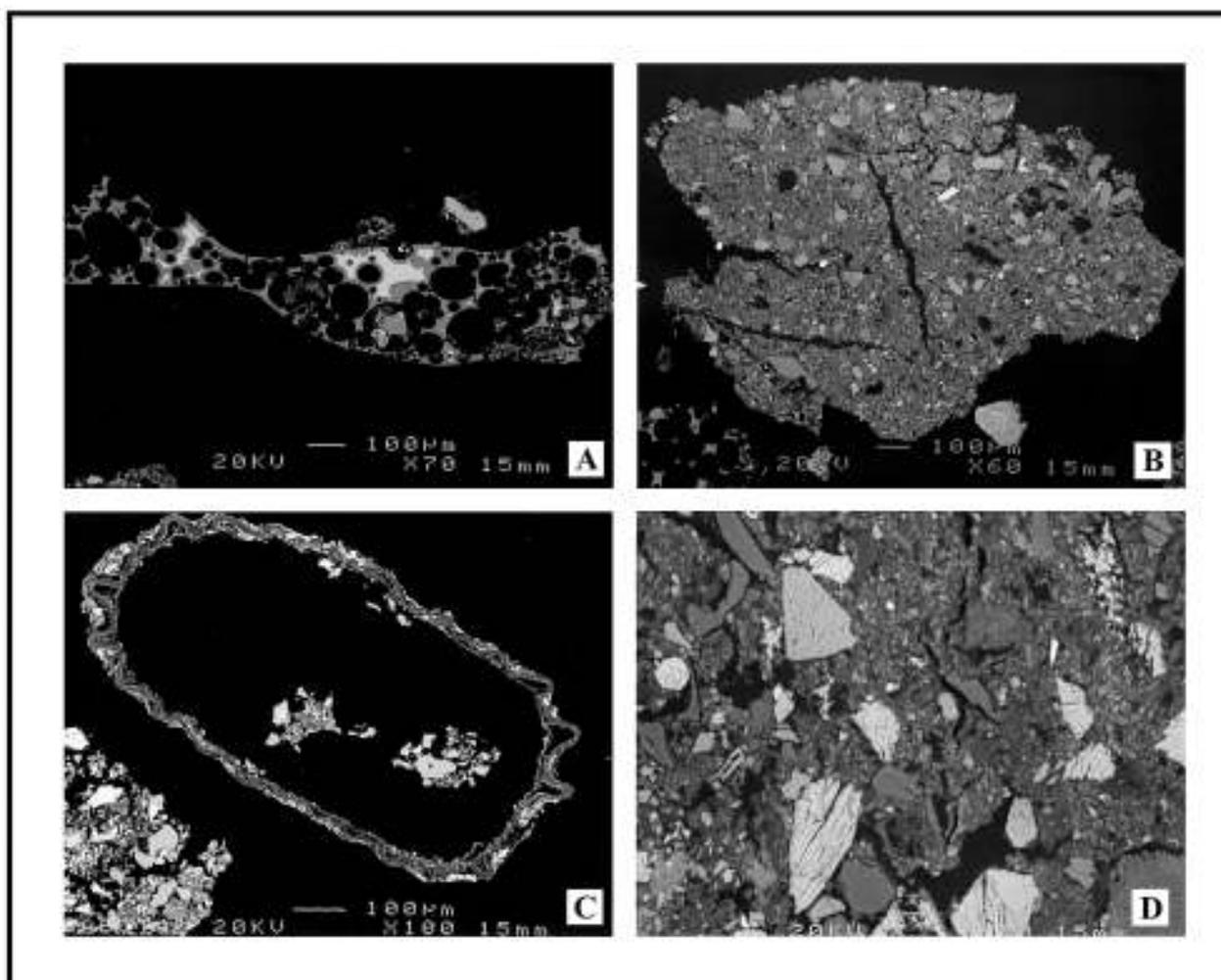


Figura 4-13: Fotografías con microscopio electrónico de barrido de sedimentos procedentes del testigo de Erandio. A, B y C a -47 cm y D a -43 cm de profundidad. Partículas antropogénicas de tamaño arena derivadas de las fundiciones (A), de granos constituidos por partículas ricas en metal (5-40 micras de tamaño de grano) contenidas en una matriz de silicato (B y D) y de productos residuales ricos en S y metales asociados como el Fe, Cr y Zn (C).

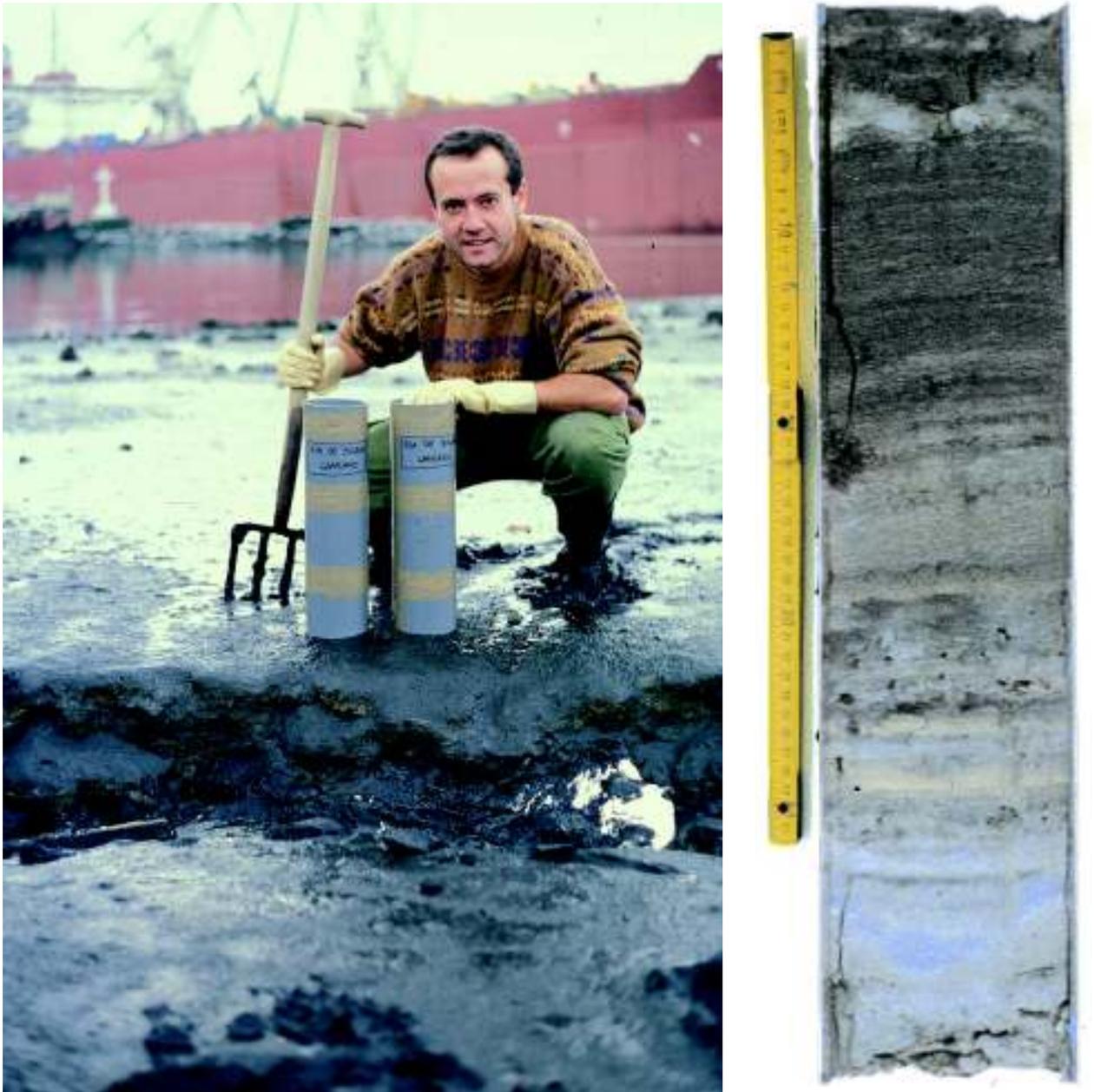


Figura 4-14 (izquierda): Los dos pequeños tubos de PVC introducidos en el fango del punto de muestreo en Udondo. **(derecha):** Sección longitudinal del testigo obtenido.

comunes en toda la secuencia sedimentaria. La asociación característica del intervalo 22-23 cm de profundidad está constituida por *A. tepida* (media 37,9%), *H. germanica* (media 25,6%), *R. irregularis* (media 10,6%), *R. anomala* (media 8,9%), *C. excavatum* (media 7,2%) y *C. lobatulus* (media 2,5%). En conjunto, estas especies representan el 93% de la asociación característica. El valor medio del índice de diversidad α es 3,5 y la composición química de los caparazones es 95% hialinos y 5% porcelanáceos. El fuerte incremento tanto en el número de individuos como en el número de especies dentro

del intervalo 20-25 cm de profundidad puede ser el resultado de la entrada de sedimentos menos contaminados procedentes del Abra exterior, dándose también un descenso en las concentraciones de metales pesados y un incremento en Al y Si (Figura 4-16). Por otra parte, la asociación de foraminíferos en la muestra 50 está constituida por *C. lobatulus* (45,8%), *H. germanica* (17,6%), *A. tepida* (15,4%) y *M. secans* (5,3%), representando en conjunto el 84% de la asociación. El índice α de diversidad es 4,5 y la composición química de los caparazones es 89% hialinos, 10% porcelanáceos y 1% agluti-

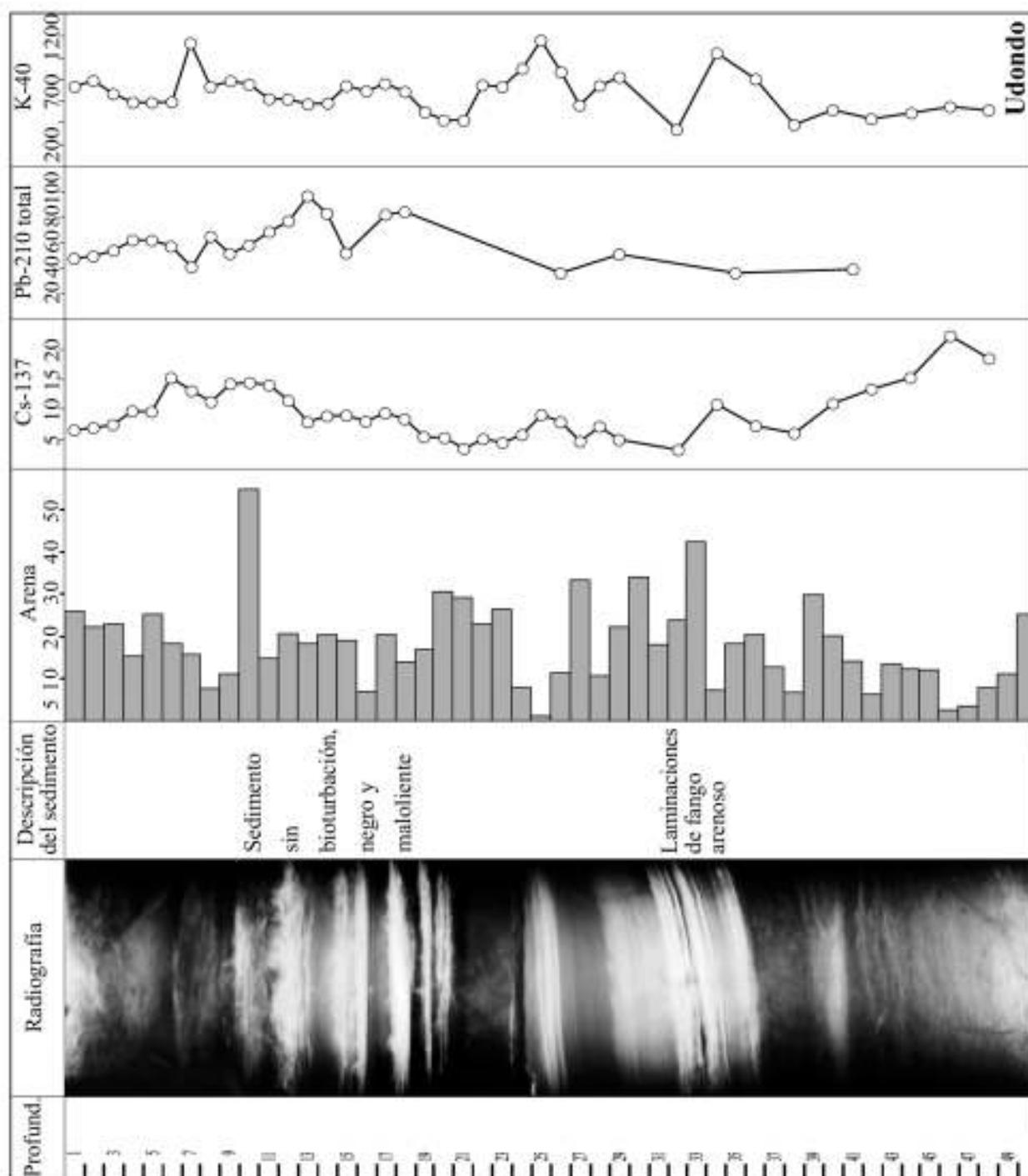


Figura 4-15: Imagen de rayos -X, contenido en arena (%), y actividad de Cs-137, Pb-210 y K-40 (Bq/kg) con la profundidad (cm) en el testigo de Udondo (Ría de Bilbao).

nantes. La razón de este incremento en el número de foraminíferos y de su diversidad específica no queda claro con los datos actuales. El resto de las especies aparecen esporádicamente en las muestras y nunca presentan más de 5 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.

El sondeo de Udondo muestra las mayores concentraciones en metales pesados del conjunto de los sondeos analizados (Tabla 4-1 y Figura 4-16).

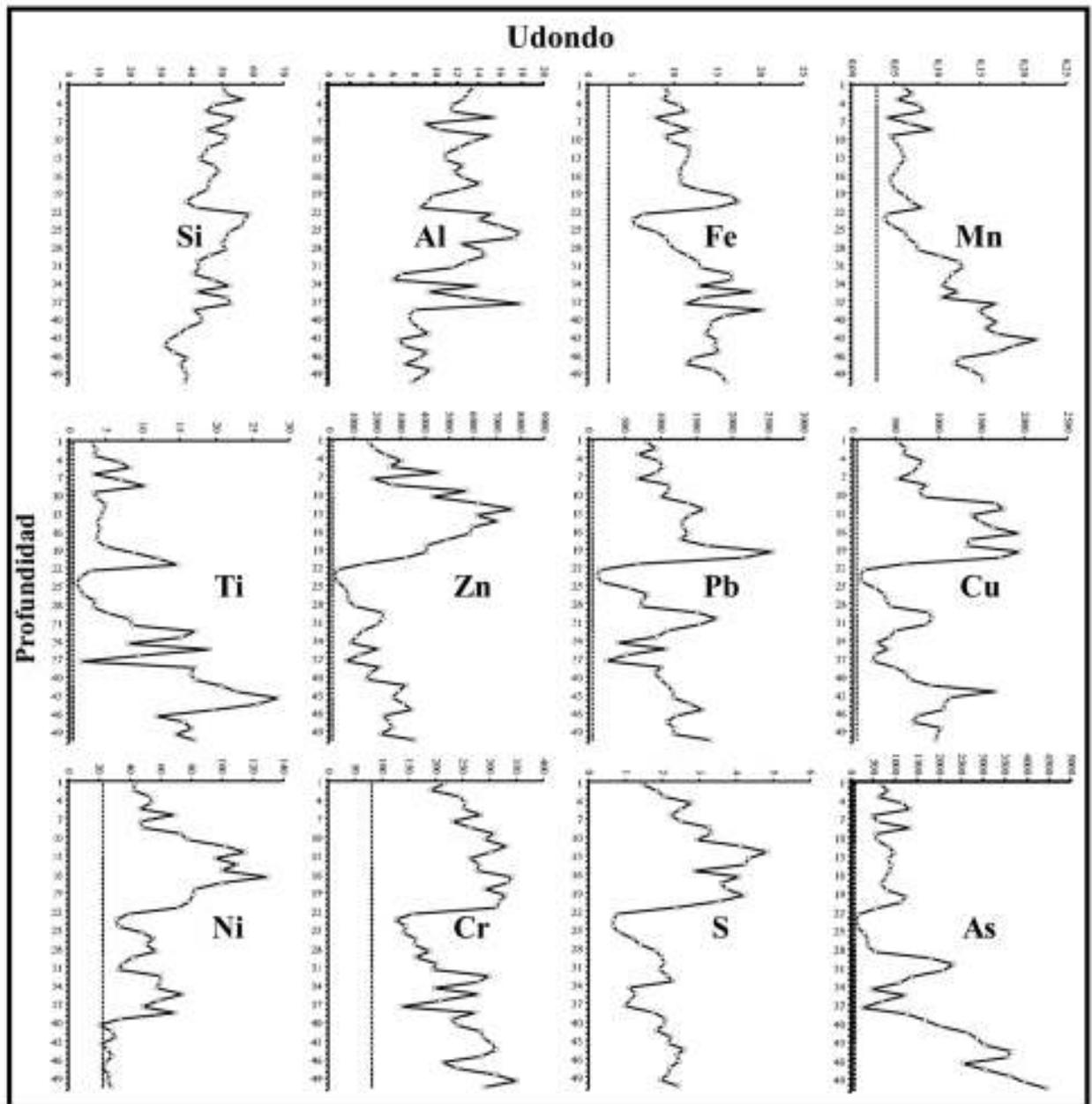


Figura 4-16: Concentraciones de elementos químicos con la profundidad (cm) en el testigo de Udondo (Ría de Bilbao). La línea vertical punteada representa el fondo geoquímico pre-industrial determinado en los sondeos holocenos. Los elementos principales en % de peso y los elementos traza en mg/kg.

Los sedimentos por debajo de 30 cm están altamente enriquecidos en Ti y As. Las elevadas concentraciones de Ti se deben a la proximidad de una gran planta de procesamiento de TiO_2 . La fuente de As está menos clara. Las empresas de procesamiento de pirita se localizan en este área, pero la falta de coincidencia con picos de otros elementos (Fe, S) dificulta corroborar si ésta es efectivamente la fuente de la contaminación. Otras posibles explicaciones podrían ser los vertidos del propio procesamiento del Ti u otro proceso industrial local no identificado. Un descenso en las concentraciones

de Pb, Ni y Zn, y más acentuado aún en Ti y As hacia la superficie del testigo puede estar provocado por la reducción de vertidos relacionados con los procesos de depuración y cierre de las empresas (la planta de procesamiento de Ti cerró en 1986) (Cearreta *et al.*, 2000).

Los perfiles de Cs-137 y Pb-210 son, al igual que en los otros sondeos, muy irregulares, pero la presencia de Cs-137 a lo largo de los 50 cm del sondeo implica que éste fue depositado después de 1954. Esto nos da una tasa mínima de sedimentación de 1 cm año⁻¹ (Cearreta *et al.*, 2000).

4.4. Discusión

4.4.a) Variaciones ambientales recientes en la Ría de Bilbao

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. Este hecho queda constatado por los diversos estudios realizados utilizando los foraminíferos bentónicos como bioindicadores de contaminación costera, a través de la evaluación de los efectos de la contaminación sobre la distribución, abundancia y morfología de los foraminíferos (Debenay *et al.*, 2001).

Los pequeños testigos descritos anteriormente alcanzan el periodo industrial reciente (ver Capítulo 3), ya que todas las muestras analizadas contenían elevadas cantidades de metales pesados. El análisis de los diferentes tipos de sondeos perforados en la Ría de Bilbao (ver Capítulos 2 y 3) representa el único modo para conocer la paleomicrofauna que permite evaluar adecuadamente las consecuencias biológicas de la contaminación sobre este estuario a lo largo del tiempo.

En general, el contenido en foraminíferos de los tres pequeños testigos analizados aquí refleja características similares a las asociaciones muertas obtenidas de las muestras superficiales recogidas en las mismas zonas de muestreo. Una de estas características es la tendencia decreciente en la cantidad de caparazones desde la desembocadura hacia la zona superior del estuario, con rápidos cambios de abundancia entre muestras adyacentes (Figura 4-17). Las características sedimentarias, geoquímicas y el contenido en foraminíferos de las muestras superficiales y de los testigos indican claramente que las condiciones ambientales en este estuario han sufrido una degradación dramática durante al menos los últimos 50 años (más tiempo

incluso si tenemos en cuenta las profundidades alcanzadas por los sedimentos del periodo industrial descrito en el Capítulo 3). Otro indicador indirecto de esta degradación es la ausencia total de bioturbación en los propios testigos.

Los resultados obtenidos en el Capítulo 2 sugieren que, al menos durante los últimos 8500 años, la Ría de Bilbao se ha caracterizado por unas asociaciones de foraminíferos semejantes a las microfaunas que se encuentran actualmente en los estuarios no contaminados de la costa cantábrica. Sin embargo, el aporte continuo de 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.

En este capítulo hemos visto que los foraminíferos vivos sólo aparecen en las zonas media e inferior de la Ría de Bilbao, aunque su número extremadamente bajo y la sola aparición ocasional de especies diferentes implica que son transportados dentro del estuario por las corrientes mareales. Pueden vivir ahí durante un corto periodo de tiempo, pero no son capaces de reproducirse dentro de la ría. Los sedimentos de los sondeos también muestran la ausencia de foraminíferos en numerosos intervalos. El registro de los foraminíferos bentónicos en este estuario refleja adecuadamente las características ambientales del medio y no se encuentra mediatizado por la destrucción de los caparazones debida a procesos *post mortem*, como podrían ser procesos diagenéticos tempranos que provocasen la disolución de los caparazones de esta microfauna (Schafer *et al.*, 1991). La elevada variación en la abundancia de foraminíferos bentónicos en las diferentes zonas del medio estuarino actual y a diferentes profundidades dentro de un mismo sondeo corrobora la idea de que los factores ambientales predominan sobre los efectos destructivos *post mortem*. Experimentos de laboratorio y observaciones de campo en la Ría de Bilbao han mostrado que el nivel de oxígeno es el factor clave para explicar la distribución de organismos en el estuario y ningún otro parámetro es capaz de causar la desaparición total de la fauna en áreas tan grandes (Sáiz-Salinas *et al.*, 1996). Los foraminíferos bentónicos utilizan el oxígeno que se encuentra en la interfase sedimento-agua y en el agua de los poros.

Presentan una pequeña demanda respiratoria de oxígeno y probablemente son capaces de sobrevivir en el límite inferior del rango de oxígeno

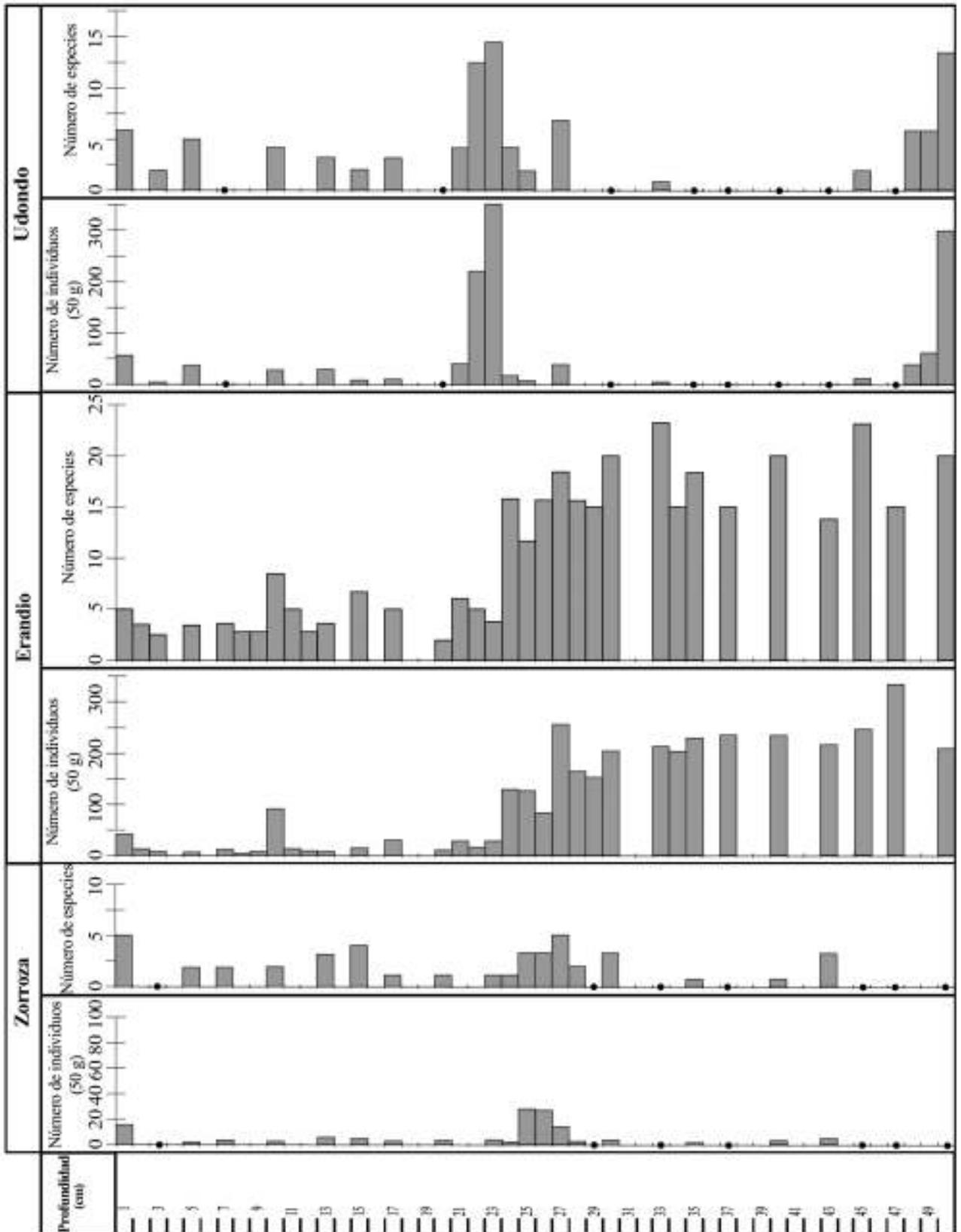


Figura 4-17: Abundancia absoluta de caparazones y especies de foraminíferos en los testigos de Zorroza, Erandio y Udondo (Ría de Bilbao). Los puntos negros representan las muestras estudiadas que no contienen foraminíferos.

(Sen Gupta y Machain-Castillo, 1993). A pesar de estos bajos requerimientos vitales, la anoxia y el carácter altamente contaminado de estos sedimentos estuarinos no permiten a los foraminíferos recolonizar el área y desarrollar poblaciones estables en la Ría de Bilbao. La variedad de fuentes de contaminación y la compleja mezcla de diferentes contaminantes en los sedimentos hacen difícil discriminar los efectos específicos de un solo contaminante sobre los foraminíferos bentónicos. En cualquier caso, es sabido que la contaminación industrial (especialmente los metales pesados) tiene un efecto nocivo sobre los foraminíferos. El efecto del incremento en la contaminación de metales pesados produce una reducción tanto en la abundancia como en la diversidad específica de toda la asociación (Yanko *et al.*, 1994) y, en casos extremos, elimina totalmente los foraminíferos de los estuarios (Ellison *et al.*, 1986; Alve 1991a; Schafer *et al.*, 1991).

Las especies vivas más comunes que se han identificado en el estuario han sido *B. spathulata*, *A. tepida* y *B. britannica*, junto con *H. germanica* y *Q. seminula* en la zona inferior del estuario. Todas estas especies se han encontrado vivas en El Abra (muestra de control 14) y/o en trabajos previos (Pascual, 1992), siendo además frecuentes en otros estuarios de esta zona costera (Cearreta, 1988). Algunas de estas especies han demostrado una gran tolerancia a los contaminantes y a los bajos niveles de oxígeno. *Brizalina spathulata* ha demostrado una particular resistencia a la reducción de oxígeno en laboratorio (Alve y Bernhard, 1995), mientras que *A. tepida* ha sido encontrada junto a puntos de vertido de metales pesados, aguas fecales y otros efluentes químicos y termales (Alve, 1995). En experimentos de laboratorio, estas especies (junto con *E. excavatum* y *Q. seminula*) mostraron actividad vital tras 24 horas de anoxia y han sido consideradas con capacidad anaeróbica por Moodley y Hess (1992). Una vez que las condiciones mejoren en la Ría de Bilbao, estas especies típicas de ambientes marino-proximales y que están entrando continuamente en el estuario como individuos vivos, deberían poder colonizar las áreas hoy alteradas y defaunadas, gracias a su capacidad natural de adaptación a las condiciones ambientales estresantes. En base a esta idea, la monitorización de las asociaciones de foraminíferos bentónicos podría ser potencialmente utilizada para valorar la efectividad de las medidas de regeneración ambiental que se están llevando a cabo actualmente según los planes estratégicos locales.

4.4.b) Implicaciones para las medidas de recuperación ambiental en la Ría de Bilbao

Como consecuencia de la severa degradación descrita anteriormente, uno de los puntos de mayor interés público en la ciudad de Bilbao es la recuperación ambiental del estuario (Sáiz-Salinas, 1997). Como se muestra en el Capítulo 3, el estuario presenta un "manto" de sedimentos altamente contaminados en las zonas intermareales que sirven de almacén para diferentes elementos químicos nocivos (metales pesados). Aunque actualmente en España no hay un estándar nacional sobre la calidad de los sedimentos, el CEDEX (1994) ha publicado unas recomendaciones para la gestión de los materiales dragados en los puertos españoles. Cearreta *et al.* (2000) comparan los resultados obtenidos en el área de la Ría de Bilbao con estas recomendaciones (en base a las concentraciones de metales pesados) y concluyen que la mayoría de las muestras superficiales y de los sedimentos obtenidos de los sondeos de Zorroza y Erandio están moderadamente contaminados. En el sondeo de Zorroza, el Cu parece ser el principal contaminante de interés ambiental, mientras que las muestras superficiales y las recogidas en el sondeo de Erandio están contaminadas con Cu, Pb, Zn y As. En comparación con las anteriores, la mayoría de las muestras recogidas en Udondo se clasifican como altamente contaminadas debido a las elevadas concentraciones en Pb, Cu y As.

La regeneración estuarina se está desarrollando actualmente dentro del Plan Estratégico de Revitalización (ver Capítulo 1). A pesar de estas medidas de regeneración, los resultados del presente estudio implican que, para cumplir con las recomendaciones del CEDEX, gran parte de los sedimentos estuarinos recientes deberían ser aislados y sería necesario poner en marcha distintas acciones correctoras. Estas acciones incluirían el dragado de los sedimentos altamente contaminados con metales pesados, la creación de lugares seguros y controlados para el depósito de los materiales dragados y la implementación de tratamientos descontaminantes para los sedimentos, todo lo cual resultaría muy difícil y costoso.

4.5. Conclusiones

Este capítulo aboga por la utilización del análisis micropaleontológico como una herramienta muy útil en el seguimiento de la transformación ambiental de un medio estuarino. Por otra parte, la calidad de pre-

servación de los caparazones de foraminíferos en los sedimentos de la Ría de Bilbao, que no presentan señales de disolución, garantiza el mejor registro posible de la respuesta biológica a la transformación ambiental extrema sufrida por este estuario a lo largo del tiempo.

Como aparece ilustrado mediante la comparación entre las condiciones originales y las características ambientales recientes, al menos durante los últimos 8500 años la Ría de Bilbao ha estado caracterizada por el desarrollo de una gran variedad de ambientes 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 (mineros, industriales y domésticos), realizados directamente y sin tratamiento previo, han provocado un cambio dramático en las características químicas de los sedimentos y la total eliminación de su microfauna característica. Un amplio rango de elementos químicos (incluyendo Ti, Fe, Cr, Pb, Zn, Cu, Ni y As) presentan concentraciones fuertemente enriquecidas en los sedimentos intermareales. Las partículas gruesas, procedentes de la minería y de las fundiciones, también son importantes fuentes de metales pesados en estos sedimentos. La escala de estos enriquecimientos en las muestras superficiales

está fuertemente ligada con la proximidad a las fuentes locales de contaminación. Sin embargo, en las muestras de los testigos las concentraciones crecen hacia la boca del estuario. La concentración de los metales pesados es lo suficientemente elevada como para clasificar estos sedimentos como altamente contaminados, lo que requiere su aislamiento del medio acuático y la aplicación de una acción correctora que permita reducir los niveles de contaminación. Muchos de los metales pesados muestran en la columna sedimentaria una reducción (localmente variable) en sus concentraciones cerca de la superficie, probablemente como reflejo de los recientes cierres de empresas y de la puesta en marcha de sistemas de tratamiento de aguas residuales.

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, sugiere 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 (Capítulo 5).

	Fe	Mn	Ti	Zn	Pb	Cu	Ni	Cr	As
Sedimentos superficiales									
Media	5,5	0,05	0,67	1092	314	263	49	310	99
Desv. estándar	1,8	0,03	0,83	512	181	175	15	232	130
Mínimo	3,5	0,03	0,30	459	98	76	27	128	<5
Máximo	9,9	0,13	3,60	2000	689	585	74	1068	515
Testigo Zorroza									
Media	4,5	0,05	0,50	468	180	161	34	158	47
Desv. estándar	0,7	0,02	0,03	177	82	103	6	56	35
Mínimo	3,2	0,08	0,42	167	75	41	23	76	12
Máximo	5,9	0,13	0,55	1000	356	433	51	315	117
Testigo Erandio									
Media	4,2	0,05	0,45	803	292	176	41	175	63
Desv. estándar	0,7	0,01	0,04	337	132	70	8	48	35
Mínimo	3,2	0,03	0,38	341	105	69	28	95	21
Máximo	5,9	0,07	0,53	2156	750	415	60	287	185
Testigo Udondo									
Media	8,5	0,07	5,70	2786	1083	849	56	251	1386
Desv. estándar	2,3	0,04	4,27	1855	482	497	28	62	1129
Mínimo	3,6	0,03	0,63	238	117	89	20	124	108
Máximo	14,3	0,16	17,1	7687	2566	1946	129	351	4447
Sedimento de los sondeos holocenos (fondo geoquímico)									
Media	2,5	0,03	0,40	63	21	20	23	85	16

Tabla 4-1: Composición elemental de la Ría de Bilbao obtenida de las muestras superficiales, pequeños testigos y sondeos holocenos. Todos los valores se presentan en mg/kg excepto el Fe, Mn y el Ti (% en peso) (tomada de Cearreta *et al.*, 2000).

APENDICE 4-A: Relación sistemática de especies de foraminíferos bentónicos identificadas en las muestras superficiales y recientes (testigos) de la Ría de Bilbao.

1. CAPARAZÓN AGLUTINANTE

- Arenoparrella mexicana* (Kornfeld) =
Trochammina inflata (Montagu) var. *mexicana*
Kornfeld, 1931
- Cribrostomoides jeffreysii* (Williamson) =
Nonionina jeffreysii Williamson, 1858
- Gaudryina rudis* Wright, 1900
- Haplofragmoides wilberti* Andersen, 1953
- Jadammina macrescens* (Brady) = *Trochammina inflata* (Montagu) var. *macrescens* Brady, 1870
- Miliammina fusca* (Brady) = *Quinqueloculina fusca* Brady, 1870
- Spirorutilis wrightii* (Silvestri) = *Spiroplecta wrightii* Silvestri, 1903
- Textularia bocki* Höglund, 1947
- Textularia earlandi* Parker, 1952
- Textularia truncata* Höglund, 1947
- Triphotrocha comprimata* (Cushman & Brönniman) = *Trochammina compromata* Cushman & Brönniman, 1948
- Trochammina inflata* (Montagu) = *Nautilus inflatus* Montagu, 1808

2. CAPARAZÓN PORCELANÁCEO

- Adelosina laevigata* d'Orbigny, 1826
- Adelosina striata* d'Orbigny, 1826
- Massilina secans* (d'Orbigny) = *Quinqueloculina secans* d'Orbigny, 1826
- Miliolinella striata* (Montagu) = *Vermiculum striatum* Montagu, 1803
- Miliolinella subrotunda* (Montagu) = *Vermiculum subrotundum* Montagu, 1803
- Quinqueloculina bicornis* (Walker and Jacob) = *Serpula bicornis* Walker and Jacob, 1798
- Quinqueloculina dimidiata* Terquem, 1876
- Quinqueloculina lata* Terquem, 1876
- Quinqueloculina oblonga* (Montagu) = *Vermiculum oblongum* Montagu, 1803
- Quinqueloculina quadrata* Nörvang, 1945
- Quinqueloculina seminula* (Linné) = *Serpula seminulum* Linné, 1758
- Quinqueloculina* sp.
- Spiroloculina depressa* d'Orbigny, 1826
- Spiroloculina excavata* d'Orbigny, 1846
- Triloculina bermudezi* Acosta, 1940

3. CAPARAZÓN HIALINO

- Acervulina inhaerens* Schultze, 1854
- Acervulina* sp.
- Ammonia tepida* (Cushman) = *Rotalina tepida* (Linné) var. *tepida* Cushman, 1927
- Astacolus crepidulus* (Fichtel and Moll) = *Nautilus crepidula* Fichtel and Moll, 1978
- Asterigerinata mamilla* (Williamson) = *Rotalina mamilla* Williamson, 1858
- Bolivina pseudoplicata* Heron-Allen and Earland, 1930
- Brizalina britannica* (Macfadyen) = *Bolivina britannica* Macfadyen, 1942
- Brizalina spathulata* (Williamson) = *Textularia variabilis* Williamson var. *spathulata* Williamson, 1858
- Brizalina variabilis* (Williamson) = *Textularia variabilis* Williamson var. *typica* Williamson, 1958
- Bulimina costata* d'Orbigny, 1826
- Bulimina elongata* d'Orbigny, 1846
- Bulimina gibba* Fornasini, 1902
- Bulimina marginata* d'Orbigny, 1826
- Buliminella elegantissima* (d'Orbigny) = *Bulimina elegantissima* d'Orbigny, 1839
- Cancris auricula* (Fichtel and Moll) = *Nautilus auricula* Fichtel and Moll, 1798
- Cassidulina carinata* (Silvestri) = *Cassidulina laevigata* d'Orbigny var. *carinata* Silvestri, 1896
- Cassidulina obtusa* Williamson, 1858
- Cibicides lobatulus* (Walker and Jacob) = *Nautilus lobatulus* Walker and Jacob, 1798
- Criboelphidium excavatum* (Terquem) = *Polystomella excavata* Terquem, 1875
- Criboelphidium williamsoni* (Haynes) = *Elphidium williamsoni* Haynes, 1973
- Elphidium crispum* (Linné) = *Nautilus crispum* Linné, 1758
- Elphidium incertum* (Williamson) = *Polystomella umbilicatulata* var. *incerta* Williamson, 1858
- Elphidium macellum* (Fichtel and Moll) = *Nautilus macellum* Fichtel and Moll, 1798
- Elphidium margaritaceum* (Cushman) = *Elphidium advenum* (Cushman) var. *margaritaceum* Cushman, 1930
- Epistominella vitrea* Parker, 1953
- Fissurina lucida* (Williamson) = *Entosolenia marginata* (Montagu) var. *lucida* Williamson, 1848

Fissurina marginata (Montagu) = *Vermiculum marginatum* Montagu, 1803

Fissurina orbygniana Seguenza, 1862

Florilus pauperatus (Balkwill and Wright) =

Nonionina pauperata Balkwill and Wright, 1885

Gavelinopsis praegeri (Heron-Allen and Earland)

= *Discorbina praegeri* Heron-Allen and Earland, 1913

Globulina gibba (d'Orbigny) = *Polymorphina* (Globuline) *gibba* d'Orbigny, 1826

Globulina sp.

Haynesina depressula (Walker and Jacob) =

Nautilus depressulus Walker and Jacob, 1798

Haynesina germanica (Ehrenberg) = *Nonionina*

germanica Ehrenberg, 1840

Lagena clavata (d'Orbigny) = *Oolina clavata* d'Orbigny, 1846

Lagena perlucida (Montagu) = *Vermiculum perlucidum* Montagu, 1803

Lagena striata (d'Orbigny) = *Oolina striata* d'Orbigny, 1839

Lagena sulcata (Walker and Jacob) = *Serpula sulcata* Walker and Jacob, 1798

Lamarckina haliotideae (Heron-Allen and Earland) = *Pulvinulina haliotideae* Heron-Allen and Earland, 1911

Laryngosyigma lactea (Walker and Jacob) = *Serpula lactea* Walker and Jacob, 1798

Lenticulina inortatus (d'Orbigny) = *Robulina inortata* d'Orbigny, 1846

Nonionella atlantica Cushman, 1947

Oolina melo d'Orbigny, 1839

Oolina squamosa (Montagu) = *Vermiculum squamosa* Montagu, 1803

Planorbulina mediterraneensis d'Orbigny, 1826

Rosalina anomala Terquem, 1875

Rosalina irregularis (Rhumbler) = *Discorbina irregularis* Rhumbler, 1906

Spirillina vivipara Ehrenberg, 1843

Trifarina angulosa (Williamson) = *Uvigerina angulosa* Williamson, 1958

Uvigerina compressa Cushman, 1926

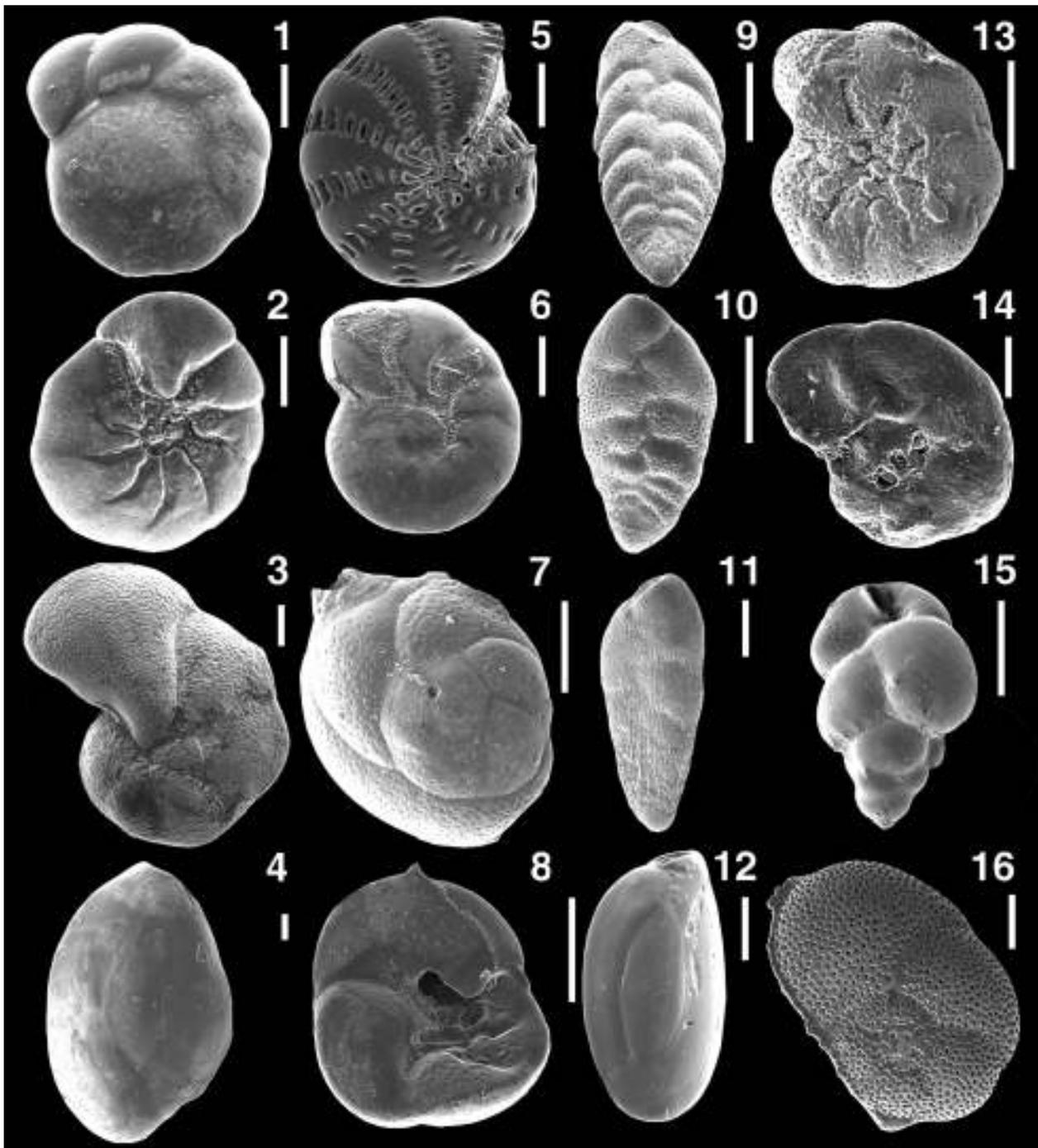
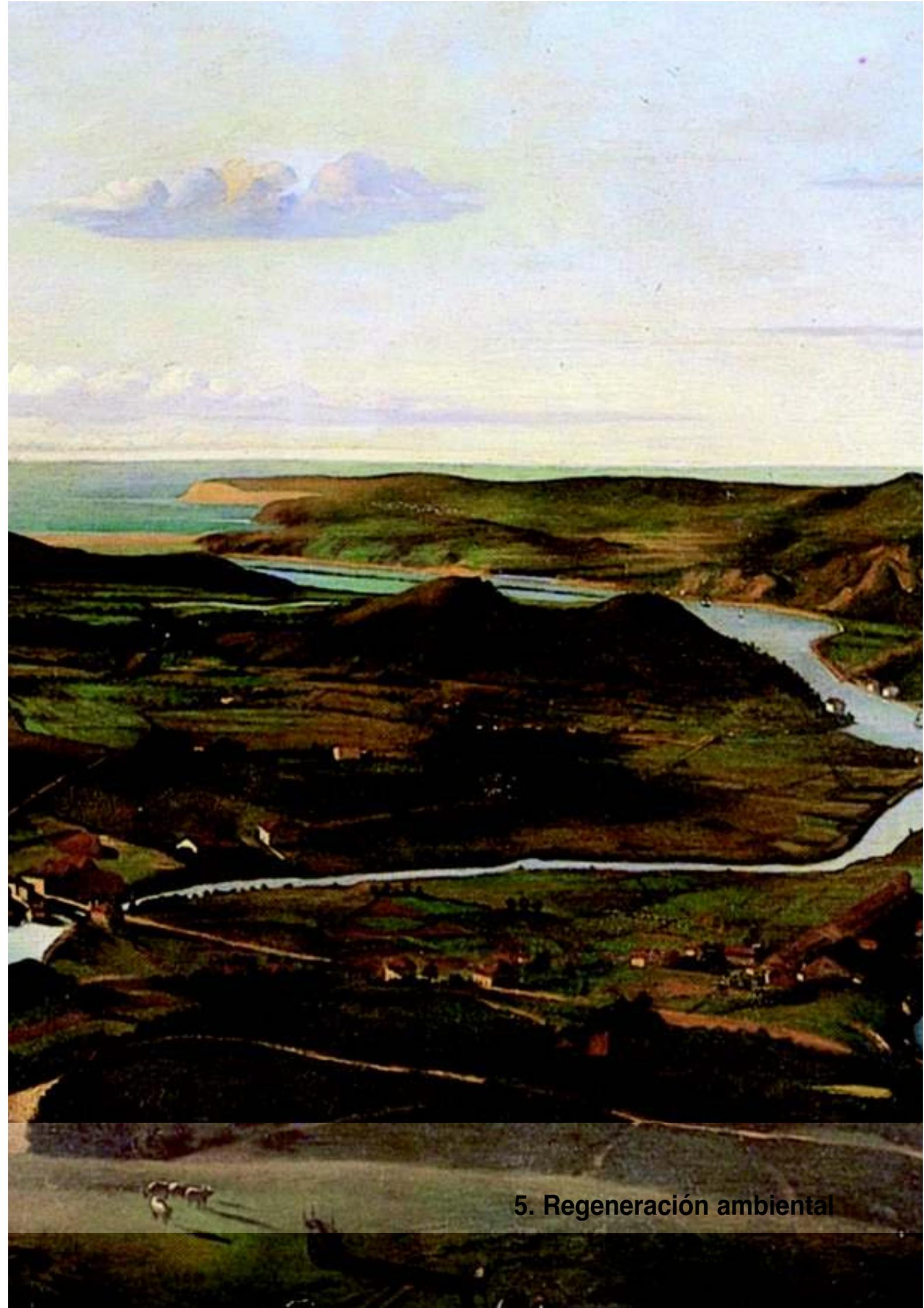


Lámina 4-1: Especies más frecuentes de foraminíferos bentónicos encontradas en las muestras superficiales y sedimentos recientes (testigos) de la Ría de Bilbao. La barra de escala indica 0,1 mm.

- | | |
|--|---|
| 1 - <i>Ammonia tepida</i> (Linné, 1758), muestra superficial 14 (Octubre 1997) | 9 - <i>Brizalina spathulata</i> (Williamson, 1858), muestra superficial 7 (Mayo 1997) |
| 2 - <i>Ammonia tepida</i> (Linné, 1758), testigo de Udondo (muestra 5) | 10 - <i>Brizalina britannica</i> (Macfadyen, 1942), muestra superficial 7 (Mayo 1997) |
| 3 - <i>Cibicides lobatulus</i> (Walker and Jacob, 1798), testigo de Udondo (muestra 50) | 11 - <i>Brizalina britannica</i> (Macfadyen, 1942), muestra superficial 7 (Mayo 1997) |
| 4 - <i>Massilina secans</i> (d'Orbigny, 1826), muestra superficial 14 (Octubre 1997) | 12 - <i>Quinqueloculina seminula</i> (Linné, 1758), muestra superficial 14 (Enero 1998) |
| 5 - <i>Cribroelphidium williamsoni</i> Haynes, 1973, muestra superficial 14 (Enero 1998) | 13 - <i>Cribroelphidium excavatum</i> (Terquem, 1875), testigo de Erandio (muestra 25) |
| 6 - <i>Haynesina germanica</i> (Ehrenberg, 1840), muestra superficial 14 (Octubre 1997) | 14 - <i>Jadammina macrescens</i> (Brady, 1870), muestra superficial 7 (Octubre 1997) |
| 7 - <i>Rosalina irregularis</i> (Rhumbler, 1906), testigo de Udondo (muestra 23) | 15 - <i>Bulimina gibba</i> Fornasini, 1902, muestra superficial 14 (Enero 1998) |
| 8 - <i>Rosalina irregularis</i> (Rhumbler, 1906), muestra superficial 6 (Octubre 1997) | 16 - <i>Rosalina anomala</i> Terquem, 1875, muestra superficial 14 (Octubre 1997) |



5. Regeneración ambiental



El enfrentamiento con la naturaleza en aras del progreso ha conducido a la situación actual de degradación de la Ría de Bilbao.

5.1. Introducción

La Ría de Bilbao presenta un gran volumen de sedimentos con altos niveles de contaminación como resultado de una intensa actividad industrial y de un acelerado crecimiento urbano entorno a la ría durante los últimos 150 años (Capítulos 3 y 4). Estos sedimentos intermareales contaminados pueden alcanzar hasta 10 m de espesor en la zona media del estuario (Capítulo 3). En general, las instituciones públicas han preferido realizar análisis químicos para evaluar los efectos de la contaminación, frente a la posible utilización de variables biológicas (González-Oreja, 1999). En este sentido, el Proyecto Integral de Regeneración Medioambiental de la Ría de Bilbao (Autoridad Portuaria de Bilbao, 1999-2000) sólo contempla la caracterización físico-química de los materiales dentro de su estudio de evaluación ambiental. Por el contrario, Phillips y Segar (1986) y Scott *et al.* (2001) consideran que los organismos bentónicos de pequeño tamaño son indicadores ambientales excepcionales. Además, Chapman y Long (1983) proponen que para evaluar el impacto de la contaminación marina es necesario desarrollar una aproximación combinada e integrada de ambos métodos químico y biológico. Con esta idea de integración de técnicas multidisciplinarias, se han publicado diversos trabajos de evaluación ambiental donde se han utilizado conjuntamente los metales pesados y los foraminíferos bentónicos como indicadores (Alve, 1991b; Cearreta *et al.*, 2000; 2002a; 2002b; Debenay *et al.*, 2001; Yanko *et al.*, 1994). Dentro de esta misma línea de trabajo se encuentran los Capítulos 3 y 4 de este volumen que aprovechan la excelente preservación de los foraminíferos en el registro sedimentario (Alve, 1991b; Sharifi *et al.*, 1991) y su capacidad para operar como indicadores de procesos ambientales en dos sentidos: químico y biológico (Murray, 2001).

Como se ha mencionado en los capítulos anteriores, actualmente la regeneración ambiental de la Ría de Bilbao se está acometiendo como parte del denominado Plan Estratégico para la Revitalización del Bilbao Metropolitano (Autoridad Portuaria de Bilbao, 1999-2000), que incluye (a) medidas preventivas, con la aplicación del Plan Integral de Saneamiento por parte del Consorcio de Aguas (Capítulo 1), y más recientemente, (b) una acción correctora dragando los sedimentos superficiales altamente contaminados.

A pesar de estas evidentes mejoras, los sedimentos contaminados acumulados en las áreas

intermareales pueden actuar a largo plazo como fuentes de metales pesados al medio acuático, a través de un retrabajamiento mecánico del sedimento (ejemplo: dragados, movimiento de buques) y de la oxidación de los sedimentos anóxicos. Por tanto, estos contaminantes podrían continuar teniendo un impacto ambiental significativo, a pesar de haber limitado las descargas y de haber implementado procedimientos de limpieza.

El principal objetivo de este capítulo es evaluar la posible mejora ambiental producida durante los últimos años y la recuperación ecológica derivada de la implementación de las medidas correctoras anteriormente citadas, mediante el estudio de la distribución de foraminíferos bentónicos y elementos químicos presentes en las muestras superficiales de las llanuras intermareales de la Ría de Bilbao, siguiendo el esquema diseñado en el Capítulo 4.

5.2. Materiales y Métodos

Se tomaron muestras superficiales adicionales para su análisis micropaleontológico en Enero, Mayo y Noviembre 2000, y Febrero y Mayo 2003 en 13 estaciones intermareales a lo largo del estuario y 1 localizada en la bahía (Figura 5-1). La muestra 13 sólo pudo recogerse en Enero y Mayo de 2000 debido a la desaparición del punto de muestreo como consecuencia de la rehabilitación urbanística de esta zona, mientras que la muestra 1 no pudo recogerse en Noviembre 2000, debido a las actividades de dragado que se estaban realizando entonces (Figura 5-2). Los lugares de muestreo seleccionados se limitaron a la zona intermareal más interna posible, haciéndolos coincidir con los seleccionados en el Capítulo 4, con el fin de comparar directamente los resultados de ambos trabajos. Además, coincidiendo con el punto de muestreo 12 (Lamiako, Figuras 5-1 y 5-7), se tomaron 7 muestras superficiales en dos muestreos correspondientes a Junio 1997 y Octubre 1997, con el objetivo de evaluar la variabilidad temporal natural del medio en esta zona. Los sedimentos superficiales dentro del estuario estaban constituidos básicamente por fango negro y maloliente, mientras que la muestra de la bahía estaba formada por arena fangosa de color marrón. El proceso de muestreo (Figura 5-3) y las técnicas de laboratorio para muestras superficiales aparecen descritos en el apartado 1.1.c. Debido al reducido número de foraminíferos presente en estas muestras, todos los caparazones existentes fueron recogidos y estudiados con una lupa binocular de luz reflejada. En total, fueron estudiadas 80 muestras y más de 6100 foraminíferos.

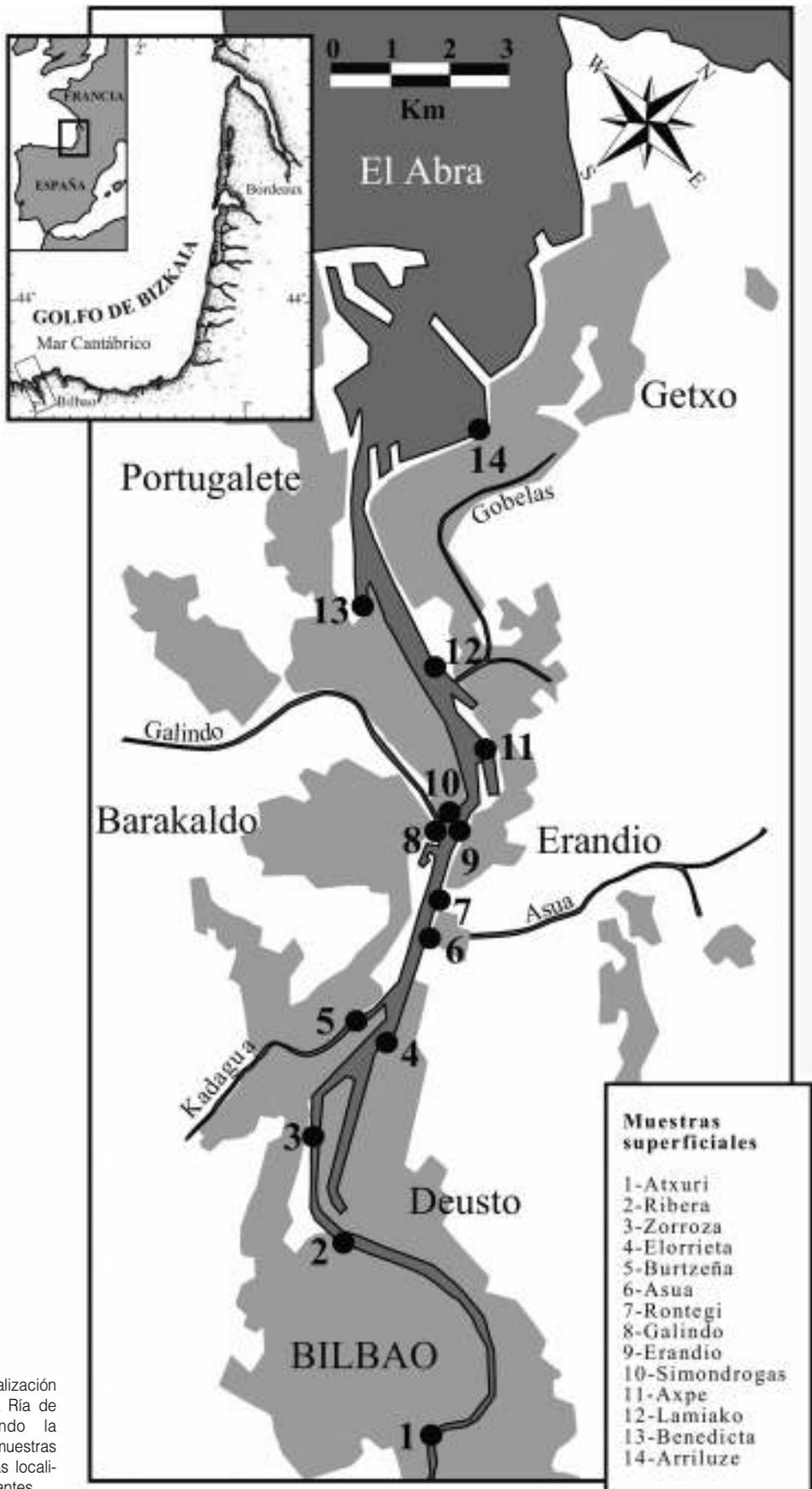


Figura 5-1: Localización geográfica de la Ría de Bilbao, mostrando la posición de las muestras superficiales y las localidades más relevantes.

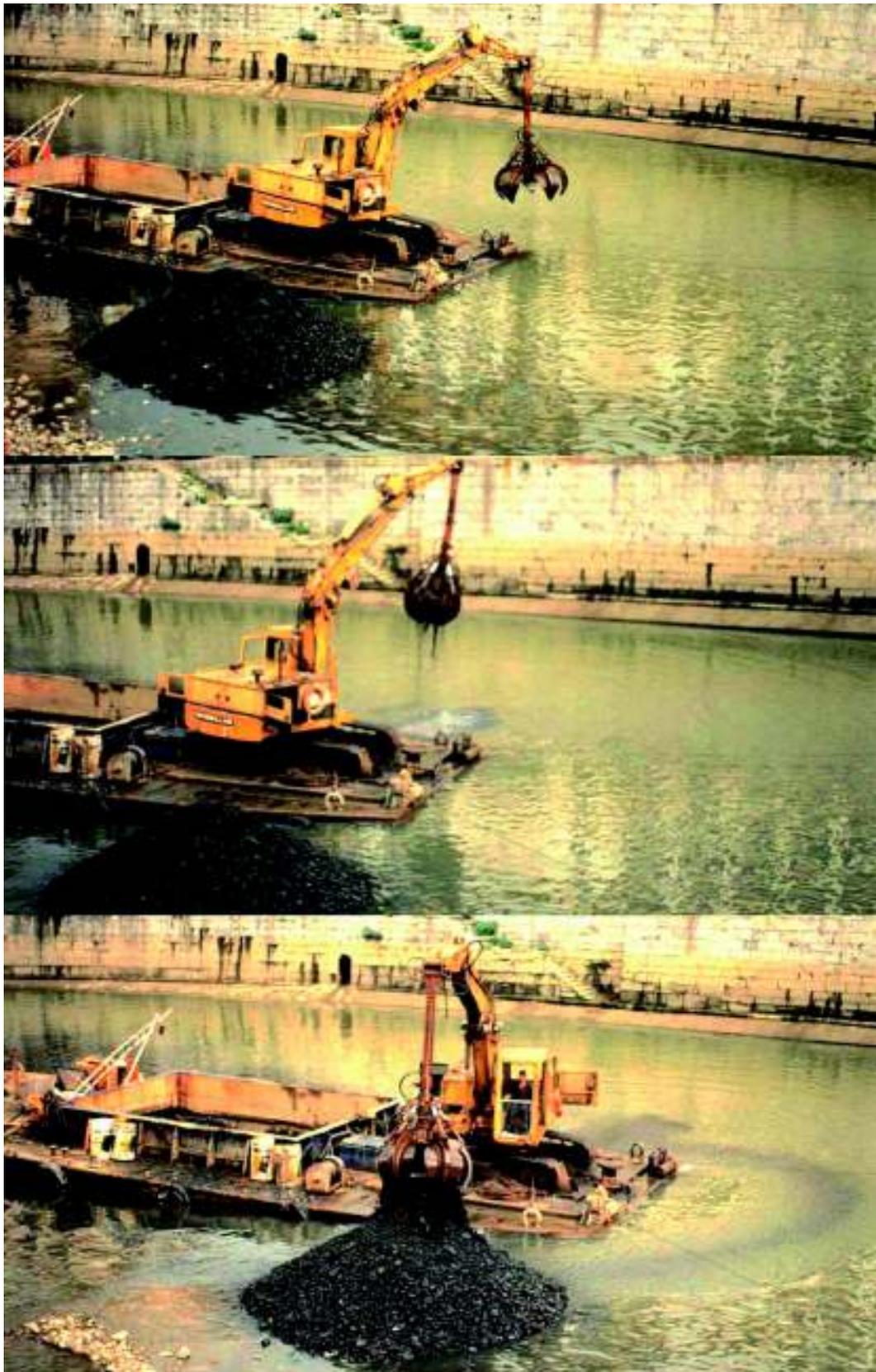


Figura 5-2: Secuencia de fotografías obtenidas durante el dragado realizado en Noviembre 2000 en el punto de muestreo 1, situado en la zona superior de la Ría de Bilbao. En la foto inferior de la secuencia se puede observar la removilización de los materiales más finos durante el dragado.



Figura 5-3: Detalle de la recogida del material superficial utilizado para el análisis micropaleontológico. Muestreo realizado en la zona de Rontegi (muestra 7-Mayo 2000).

5.3. Resultados

Como ya se ha descrito en los capítulos anteriores, el uso del Rosa de Bengala permite diferenciar los individuos 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 asociaciones que se analizan separadamente.

5.3.a) Asociaciones vivas

En la Ría de Bilbao los valores de la abundancia (80 cm²) de foraminíferos bentónicos son extremadamente bajos en todas las estaciones y varían enormemente a lo largo del canal mareal, desde un mínimo de 0 individuos en algunas muestras del estuario superior, medio y parte del inferior (muestras 1-11) durante todos los muestreos realizados, hasta un máximo de 112 individuos en la zona estuarina más inferior (muestra 13) en Mayo 2000 y 244 individuos en la muestra intermareal obtenida en la bahía (muestra 14, Mayo 2000) (Figura 5-4). La escasa abundancia presente en toda la ría y el gradiente negativo hacia la cabecera del estuario indican claramente la continuidad en el tiempo de las condiciones ambientales desfavorables para que vivan y se reproduzcan las poblaciones de foraminíferos bentónicos.

En la zona superior del estuario (muestras 1-5), sólo aparecen foraminíferos vivos en las muestras 4

y 5-Mayo 2000 y en la muestra 3-Febrero 2003 (Figura 5-4). En las dos muestras más altas (muestras 1 y 2, Figuras 5-1 y 5-5) no aparecen foraminíferos vivos en ningún momento del estudio.

En la zona estuarina media (muestras 6-10, Figuras 5-4 y 5-6), los valores de abundancia observados también fueron extremadamente bajos (alcanzando un máximo de 4 individuos en la muestra 7-Mayo 2000) aunque aquí todas las muestras presentan foraminíferos vivos en alguno de los muestreos. Sin embargo, no aparecen foraminíferos vivos en ninguna de las muestras recogidas en la zona media en Enero 2000, Octubre 2000, ni en Mayo 2003. En consecuencia, no se ha podido distinguir ninguna zonación estacional clara en este tramo del estuario.

En la zona inferior de la ría aparecen foraminíferos vivos en todos los muestreos, excepto en Octubre 2000. Los resultados son muy variables: 112 individuos en la muestra 13-Mayo 2000; 40 individuos en la muestra 11-Febrero 2003; 0 individuos en la muestra 11 durante los muestreos de Mayo y Octubre 2000 y la muestra 12-Octubre 2000.

Finalmente, en la muestra de la bahía (muestra 14, Figuras 5-1 y 5-4), los rangos oscilan entre los 10 individuos de Enero 2000 y los 244 individuos de Mayo 2000. A pesar de que en esta zona aparecen foraminíferos vivos en todos los muestreos realizados, su abundancia sigue siendo muy baja para este tipo de ambientes (Cearreta *et al.*, 2000).

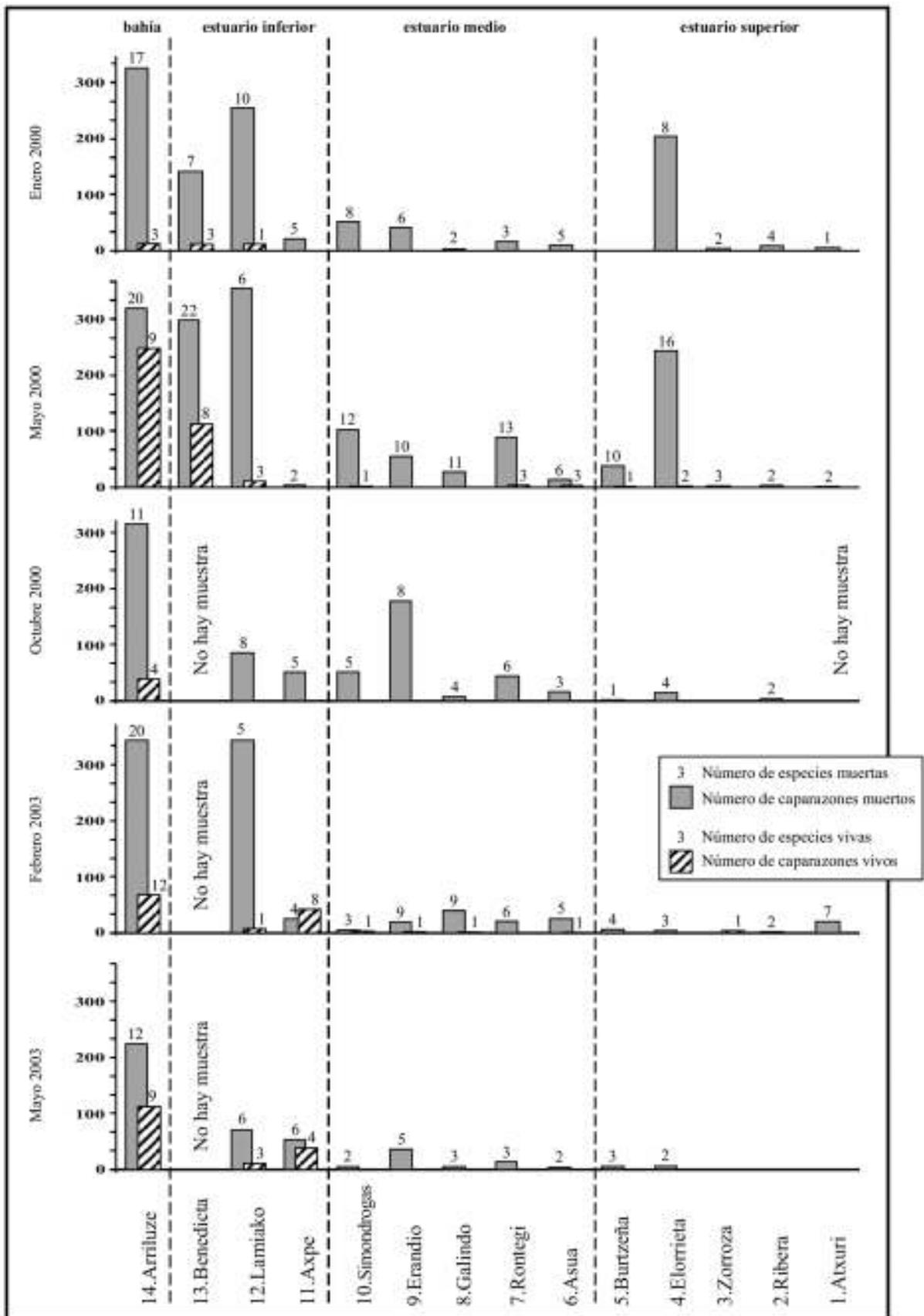


Figura 5-4: Abundancia de foraminíferos vivos y muertos en las muestras de sedimento superficial a lo largo de la Ría de Bilbao.



Figura 5-5: Muestreo de materiales superficiales para los análisis micro-paleontológico y geoquímico en la zona de Atxuri (muestra 1), zona superior del estuario.

Si consideramos que cualquier zona estuarina está soportando en todo momento la mayor abundancia posible de foraminíferos, el gradiente negativo en la abundancia de individuos observado conforme ascendemos por el canal de la ría indica claramente unas condiciones ambientales muy desfavorables para el desarrollo de las poblaciones de foraminíferos bentónicos. Esta distribución sugiere la existencia de una barrera ecológica que impide la colonización de la Ría de de Bilbao por parte de los foraminíferos (Capítulo 4).

Durante el periodo de estudio se encontraron 17 especies diferentes de foraminíferos bentónicos viviendo en el estuario, aunque el máximo número de especies encontradas contemporáneamente en una estación de muestreo fue 8 (muestra 13-Mayo 2000 y muestra 11-Febrero 2003). Por otro lado, la estación situada en la bahía presentó un total de 20 especies vivas diferentes pero sólo 12 de ellas se encontraron juntas en este lugar en un mismo momento.

Las especies más recurrentes encontradas en la ría han sido *H. germanica*, *Q. seminula*, *A. tepida*, *B. spathulata* y *B. britannica*. Sin embargo, sus especímenes aislados y encontrados ocasionalmente en algunas muestras, sugieren de nuevo que éstos han sido transportados dentro del estuario y que no son capaces de reproducirse dentro del mismo. La muestra más próxima a la desembocadura (muestra 13) presentó la mayor abundancia y diversidad del estuario aunque no se encontraron nunca más de 112 individuos vivos de 8 especies diferentes en el mismo momento (Mayo 2000). Las especies más abundantes aquí fueron: *B. spathulata* (máximo 32 individuos-Mayo 2000), *Bulimina gibba* (máximo 30 individuos-Mayo 2000), *A. tepida* (máximo 18 individuos-Mayo 2000), *Bulimina marginata* (máximo 7 individuos-Mayo 2000) y *H. germanica* (máximo 3 individuos-Mayo 2000). El resto de las especies vivas presentaban sólo 1 ó 2 individuos.

En la bahía, la muestra 14 siguió mostrando mayor diversidad y abundancia que cualquiera de las muestras estuarinas, aunque los valores obtenidos continúan siendo mucho más bajos de los que cabría esperar para un medio de este tipo en condiciones normales y sin contaminación (Cearreta, 1988; Murray, 1991). La mayor abundancia encontrada fue de 244 individuos de 9 especies diferentes (Mayo 2000). Las especies más abundantes fueron *H. germanica*, (máximo 100 individuos-Mayo 2000), *A. tepida* (máximo 99 individuos-Mayo 2000), *Q. seminula* (máximo 14 individuos-Mayo 2000), *C. lobatulus* (máximo 8 individuos-Febrero 2003), *B. spathulata* (máximo 5 individuos-Mayo 2000), *B. marginata* (máximo 5 individuos-Mayo 2000), *B. gibba* (máximo 5 individuos-Mayo 2000), *Aubignyna hamblensis* (máximo 3 individuos-Mayo 2000) y *Bulimina elongata* (máximo 3 individuos-Mayo 2000). El resto de las especies mostraban sólo 1 ó 2 especímenes.

Por otra parte, este punto de muestreo contenía representantes de las especies más frecuentes encontradas en las muestras estuarinas, contando con un total de 18 especies de las que sólo aparecieron simultáneamente 12. Ésto sugiere que la bahía es la posible área fuente de las microfaunas de foraminíferos que aparecen dentro del estuario. No se han encontrado representantes de las especies *Brizalina variabilis*, *Fursenkoina fusiformis*, *Q. lata*, *B. elegantissima*, *Cornuspira involvens*, *Hormosina moniliforme* y *Miliammina fusca*, que dentro del estuario y en conjunto presentaban un total de 9 individuos. Probablemente estas espe-



Figura 5-6: Muestreo superficial en la zona de Rontegi (muestra 7), zona media de la Ría de Bilbao.

cies no han sido determinadas aún en la bahía debido al número reducido de individuos vivos encontrados estacionalmente en la muestra 14.

5.3.a) Asociaciones muertas

Como ya se ha mencionado en el Capítulo 4, las asociaciones vivas (teñidas) y muertas difieren entre sí en mayor o menor grado. Las posibles causas de esta diferencia pueden dividirse en dos: producción y cambios *post mortem*, particularmente destrucción de caparazones y transporte. En este sentido, Murray y Alve (1999) demuestran que es esencial la distinción entre ambas asociaciones frente a la asociación total (individuos vivos y muertos juntos) y que debido a los procesos *post mortem*, la asociación total ofrece un resultado no representativo. Murray (2003) señala como en el estuario de Exe (UK), la asociación muerta por sí sola no representa de manera fiable las condiciones del medio debido a que numerosas especies que aparecen vivas no estaban presentes en la asociación muerta.

Los caparazones de foraminíferos encontrados en este capítulo no muestran signos de disolución, fenómeno que tampoco aparece en los materiales

analizados en los capítulos anteriores. Como se ha mencionado anteriormente, el número de foraminíferos vivos en el estuario es tan escaso que puede concluirse que el transporte activo de caparazones o la removilización de los sedimentos (dragados) son las únicas causas posibles como responsables de la mayor abundancia de individuos en las asociaciones muertas con respecto a las vivas.

Se han encontrado caparazones muertos de foraminíferos en prácticamente todas las muestras (excepto en las muestras 1 y 2 Mayo 2003, en la muestra 3-Octubre 2000, Febrero 2003 y Mayo 2003 y en la muestra 5-Enero 2000) y a lo largo de todo el año, incluyendo la muestra procedente de la zona intermareal más alta del estuario y situada a 15 km de la desembocadura (muestra 1, Figura 5-1). Ésto demuestra un transporte de foraminíferos continuo y muy efectivo hacia las zonas superiores del estuario, presentando éstos un comportamiento hidrodinámico similar al de otras partículas de sedimento. Este transporte incluye tanto especies pequeñas movilizadas en suspensión (como *B. britannica* y *Cassidulina obtusa*) además de caparazones robustos transportados como carga de lecho (por ejemplo, *C. lobatulus*, *G. rudis* y *M. secans*).

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 una mayor diversidad que las asociaciones vivas. El número medio de especies en las asociaciones muertas por muestra dentro del estuario es mayor de 6, mientras que la diversidad media de las asociaciones vivas es menor de 1. La muestra con mayor diversidad específica en el estuario es la muestra 13-Mayo 2000 con un máximo de 22 especies diferentes. En la bahía, la muestra 14 (Mayo 2000 y Febrero 2003) presenta 20 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 (Figura 5-4). Las asociaciones más abundantes y diversas se sitúan en los puntos menos protegidos de la mitad inferior del estuario (muestra 12, Figura 5-1). Además, como resultado de este efectivo transporte sedimentario por las corrientes mareales, el número de caparazones de foraminíferos varía enormemente de modo estacional incluso en el mismo punto de muestreo.

Uno de los casos más ilustrativos es la muestra 4 (situada en el estuario superior, Figuras 5-1 y 5-4) que presentó una asociación muerta con 2 individuos en Octubre 2000, 4 individuos en Febrero 2003, 206 individuos en Enero 2000, 243 individuos en Mayo 2000 y 6 individuos en Mayo 2003. Por el contrario, las asociaciones vivas en este mismo punto de muestreo mostraron 3 individuos en Mayo 2000 y 0 el resto de los muestreos. También hay que destacar el comportamiento de la muestra 12 (Figura 5-7), que presenta un elevado aunque variable número de individuos (media 255, rango 84-356) y un bajo número de especies (media 7, rango 5-10).

Con el fin de evaluar esta aparente variabilidad estacional se tomaron siete muestras superficiales muy próximas entre sí en el punto de muestreo 12. Este punto se localiza a +2,26 sobre el nlm y, como consecuencia de su mayor exposición subarérea con respecto al resto de zonas intermareales del estuario, presenta un sedimento superficial de color marrón con poblaciones estables del poliqueto *Nereis diversicolor* y del bivalvo *Scrobicularia plana*. La recogida de muestras se realizó en dos ocasiones, correspondientes a Junio 1997 y Octubre 1997 (Figura 5-8). Los resultados indican que al incrementar el número de muestras analizadas para un punto, la media de individuos asignados a este punto de muestreo desciende a casi una



Figura 5-7: Zona de muestreo superficial de Lamiako (muestra 12), en la zona inferior de la Ría de Bilbao.

cuarta parte (media 66, rango 2-445) mientras que la media de especies encontradas se mantiene estable (media 7, rango 1-16). Por otra parte, y como cabría esperar, los rangos obtenidos al analizar más cantidad de sedimento son mucho mayores. Comparando los dos muestreos aparecen dos diferencias especialmente significativas. En primer

lugar, en Octubre 1997 se recolectaron prácticamente el doble de individuos muertos que en Junio 1997 (601 frente a 323 respectivamente), mientras que el número de individuos vivos, a pesar de ser muy bajo, es casi el doble en Junio 1997 con respecto a Octubre 1997 (39 frente a 23 respectivamente). Las especies más recurrentes encontradas

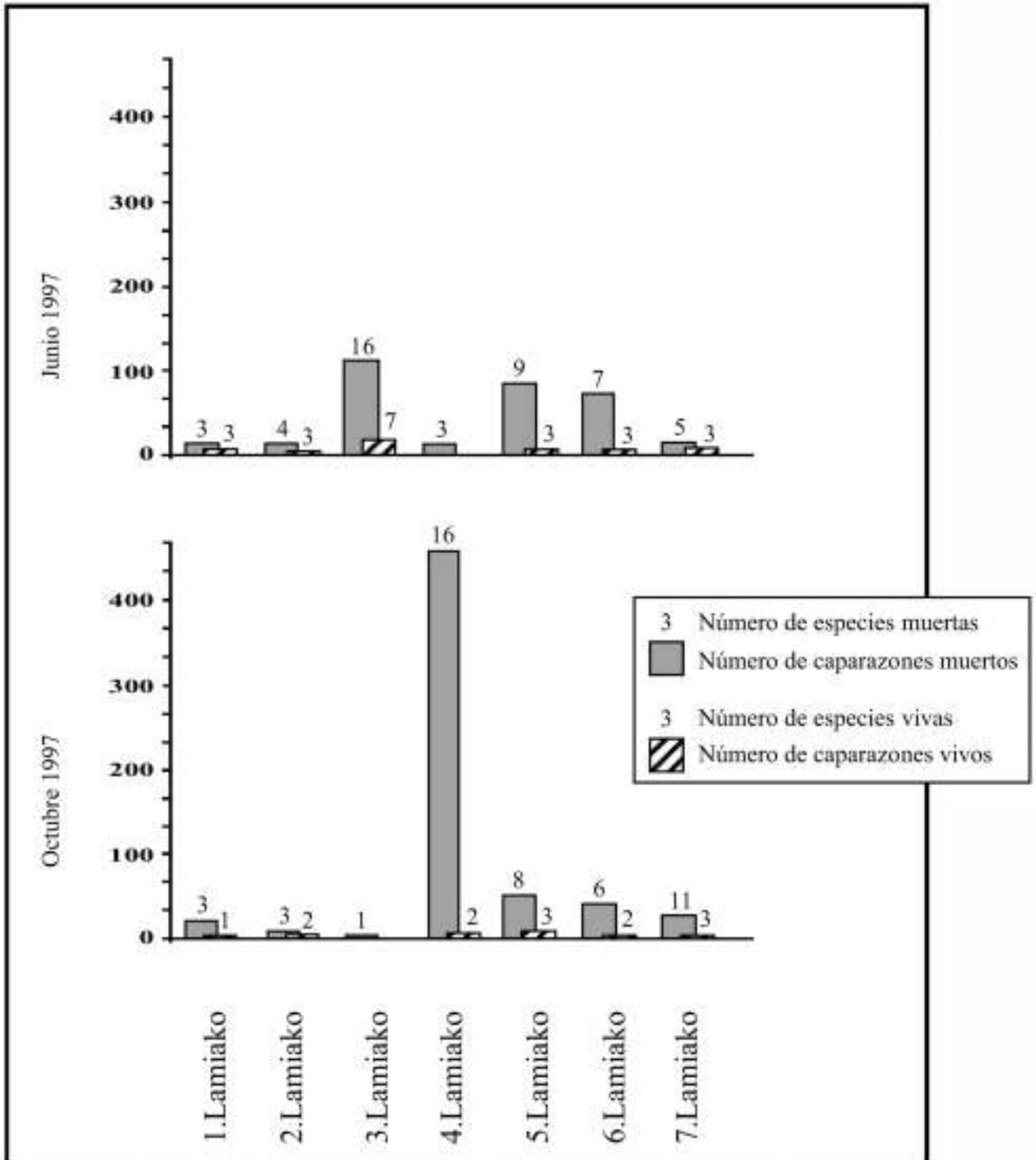


Figura 5-8: Abundancia de foraminíferos vivos y muertos en las muestras de sedimento superficial correspondientes a los muestreos de Junio 1997 y Octubre 1997 en Lamiako (muestra 12), zona inferior del estuario.

en las siete muestras a lo largo de los dos muestreos estacionales son *A. tepida* y *H. germanica*, que aparecen de manera constante en todas las muestras dentro de la asociación muerta. En esta asociación los componentes secundarios son *C. excavatum* y *C. lobatulus*, junto con *R. anomala* y *R. irregularis* en Junio 1997 y con *C. williamsoni* en Octubre 1997. Dentro de la asociación viva domina *A. tepida* junto con *Q. seminula* en Junio 1997 y con *H. germanica* en Octubre 1997.

En total, se han encontrado en las asociaciones del estuario 65 especies diferentes listadas en el Apéndice 5-A. Esta cifra incluye las 26 especies encontradas vivas en las muestras, de las cuales 3 aparecen exclusivamente con individuos vivos, además de otras 39 especies que aparecen sólo en las asociaciones muertas. Además, de las 65 especies encontradas, 10 de ellas únicamente se presentan en la muestra de la bahía y 26 lo hacen sólo en el estuario. Las especies más comunes encontradas en las muestras estuarinas fueron *A. tepida* y *H. germanica*, que están presentes en la mayoría de las estaciones de muestreo a lo largo de todo el año con varios individuos (oscilando entre 0 y 311, con una media de 45 especímenes de ambas especies por muestra). El resto de las especies aparecen esporádicamente en algunas muestras y siempre con 1 ó 2 individuos solamente, aunque *C. williamsoni*, *C. oceanensis* y *C. lobatulus* aparecen de manera más regular.

Las muestras de sedimento superficial también contienen otros organismos como las tecamebas, más comunes en el estuario superior y medio donde descargan los afluentes, algunos ostrácodos, foraminíferos planctónicos y pequeños moluscos.

5.3.c) Estudio geoquímico

El análisis de los resultados del Capítulo 4 permite concluir que las concentraciones de metales pesados en las muestras superficiales de la Ría de Bilbao exhiben una variabilidad considerable (Figura 4-6), incluso cuando han sido muestreadas en puntos adyacentes, y que los valores obtenidos son extremadamente altos en comparación con los valores del fondo geoquímico local. Los análisis realizados para este estudio de seguimiento están basados en los efectuados para el Capítulo 4, de manera que la comparación de los resultados entre ambos estudios sea lo más precisa posible.

Debido al gran volumen de información de que se dispone (se incluyen dos nuevos muestreos

correspondientes a Enero 2000 y Febrero 2003 para todos los elementos analizados en el Capítulo 4) y a que el análisis geoquímico no es el objetivo prioritario de este trabajo, se ha simplificado la representación gráfica con el fin de explicar mejor el comportamiento de los elementos químicos y comparar su comportamiento con el mostrado por los foraminíferos a lo largo del tiempo en las muestras superficiales (Figura 5-9; Tabla 5-1).

Los resultados obtenidos en el análisis geoquímico del muestreo Enero 2000 no presentan variaciones significativas respecto al muestreo Octubre 1997 (Capítulo 4). Sin embargo, los resultados obtenidos en Febrero 2003 presentan una reducción de hasta un 50% en las concentraciones de algunos elementos (Ni, Pb) con respecto a los primeros valores obtenidos en Octubre 1997. Esta reducción es más importante en los tramos superior (donde los valores se aproximan al fondo geoquímico) y medio del estuario para el Cu, Cr, Zn y Pb, mientras que en el tramo inferior esta reducción es menos evidente (Figura 5-9).

5.4. Discusión

5.4.a) Interpretación del contenido microfaunístico y evaluación del desarrollo temporal de las asociaciones de foraminíferos bentónicos en las muestras superficiales

En un medio ambientalmente tan deteriorado como la Ría de Bilbao (Capítulos 3 y 4) es muy difícil determinar con precisión cuales son los factores determinantes de la distribución de los foraminíferos bentónicos en las áreas intermareales de la ría. Además de la carga contaminante presente en el agua y los sedimentos, estos medios marinos intermareales presentan una gran variabilidad natural en sus condiciones físico-químicas como respuesta a los cambios diarios, estacionales y también a más largo plazo en el aporte fluvial, rango de mareas, temperatura ambiental, etc. En cierto sentido, el único atributo constante de estos medios marino marginales es precisamente su variabilidad (Alve y Murray, 1999).

Por una parte, hay que tener en cuenta los procesos tafonómicos que experimentan las asociaciones presentes en un medio energético como la Ría de Bilbao. Los principales procesos que pueden afectar a la composición de la asociación muerta y que posteriormente será enterrada son: el transporte con adición o pérdida de caparazones, y la destrucción de los caparazones, bien por disolución

química o por fracturación mecánica (Murray y Alve, 1999). En este sentido, en la Ría de Bilbao hemos detectado un transporte efectivo de caparazones de foraminíferos, como carga de fondo, de al menos 15 km desde la desembocadura hasta la cabecera del estuario, como lo demuestra la pre-

sencia de especies exóticas robustas procedentes de la bahía en la muestra más superior de la ría (ejemplo, *G. rudis* y *C. lobatulus*). Así mismo, no se han encontrado evidencias de disolución en los caparazones de foraminíferos presentes tanto en los sedimentos actuales como en la columna sedi-

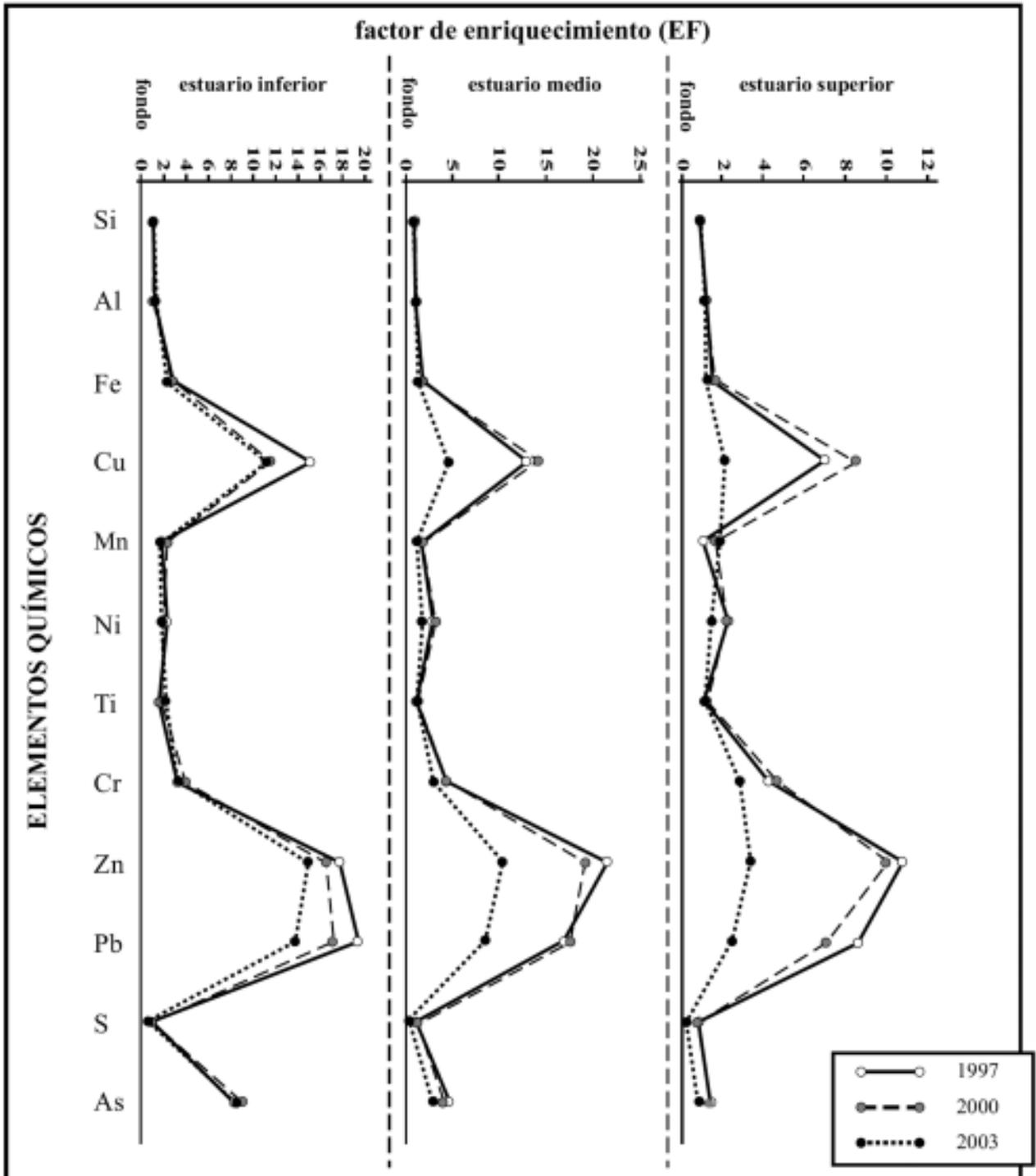


Figura 5-9: Comparación de los factores de enriquecimiento de los diferentes elementos químicos analizados en las muestras superficiales de la Ría de Bilbao. Se comparan los resultados obtenidos en el periodo 1997-2003 para las diferentes zonas en que se ha dividido el estuario.

mentaria. Este hecho probablemente está relacionado con la presencia de una elevada concentración de CaCO_3 en el agua, resultado de la naturaleza fundamentalmente carbonatada de la cuenca geológica (Cearreta y Murray, 2000).

Por otra parte, es común que la asociación muerta sea más abundante y biodiversa que la asociación viva procedente de la misma muestra, excepto en el caso de pérdida de caparazones por procesos *post mortem* o porque la velocidad de sedimentación sea muy alta. Normalmente, esta diferencia se interpreta asumiendo que la asociación muerta representa la acumulación de sucesivas asociaciones vivas a lo largo del tiempo (Murray, 2003). Sin embargo, en el caso de la Ría de Bilbao, la asociación muerta parece haberse formado exclusivamente gracias al transporte de caparazones desde el mar abierto ya que, como hemos visto en el Capítulo 4, las condiciones ambientales adversas que dominan dentro del estuario impiden la existencia de poblaciones estables de foraminíferos. Esta asociación muerta ofrece, potencialmente, el máximo número de especies posible que podemos encontrar en un medio (Murray, 2003). En la ría se han encontrado 39 especies que no han mostrado representantes vivos. Del mismo modo, podemos encontrar especies vivas que no se encuentran en la asociación muerta. Según Murray (2003), ésto puede deberse a un registro incompleto, a un muestreo inadecuado, o porque han sido introducidas recientemente y todavía no han producido caparazones muertos. En este estuario sólo se han encontrado tres especies vivas sin representantes en la asociación muerta, que son *A. hamblensis*, *B. elegantissima* y *C. involvens*. Este hecho probablemente se debe al reducido y variable número de caparazones presentes en las asociaciones de foraminíferos contenidas en los sedimentos recientes de la Ría de Bilbao.

Así, tanto la diversidad como la abundancia están seriamente condicionadas por la variabilidad del medio y la capacidad de transporte y depósito de materiales desde la plataforma. En Lamiako (muestra 12) puede encontrarse un claro ejemplo en este sentido, con una gran variabilidad entre muestras muy próximas (de 2 caparazones en Lamiako-3 a 445 caparazones en Lamiako-4 en Octubre 1997) y dentro de la misma muestra en diferentes momentos (de 9 a 445 caparazones, en Lamiako-4 entre Junio y Octubre 1997 respectivamente) (Figura 5-8). Un hecho similar ha podido ser observado en los resultados geoquímicos. Como

ejemplo representativo podemos mencionar que en algunos puntos de la zona mediainferior del estuario (muestras 10 y 11) la concentración de un determinado metal en una muestra puede llegar casi a duplicar la concentración detectada en una réplica recogida a escasos metros dentro del mismo punto de muestreo (Irabien *et al.*, 2001).

Según Alve (1999), estos mismos procesos de transporte que explican esta variabilidad registrada son uno de los posibles mecanismos de dispersión de los foraminíferos. La capacidad de movimiento activo propio de los foraminíferos, debido a su pequeño tamaño, está reducida a mm o unos pocos cm, teniendo este movimiento un carácter más aleatorio que direccional. Por otro lado, el transporte por corrientes mareales, oleaje, etc, permite a los foraminíferos un desplazamiento pasivo a distancias considerables. Los foraminíferos así transportados, en caso de llegar a un medio favorable, se pueden reproducir y convertirse en colonizadores exitosos. Sin embargo, si el medio es hostil no son capaces de establecer poblaciones estables y mueren (Murray, 2003). Alve (1999) también apunta que estos procesos de transporte operan continuamente en los medios marinos y normalmente contribuyen a cambiar los patrones de distribución de las especies a lo largo del tiempo.

Foraminíferos vivos se han encontrado prácticamente a lo largo de toda la Ría de Bilbao, si exceptuamos las dos muestras más altas que presentaban un número extraordinariamente bajo de individuos. Las especies vivas más comunes que se han identificado en el estuario han sido *H. germanica*, *Q. seminula*, *A. tepida*, *B. spathulata* y *B. britannica*, junto con *B. gibba* y *B. marginata* en la zona inferior del estuario. Todas estas especies se han encontrado vivas en el Abra (muestra de control 14) y/o en trabajos previos (Pascual, 1992, Cearreta *et al.*, 2000) siendo a su vez formas comunes en otros estuarios de esta zona costera (Capítulo 4). Algunas de estas especies han demostrado una gran tolerancia a los contaminantes y a los bajos contenidos en oxígeno. Así, *B. spathulata* ha demostrado una particular resistencia a la reducción de oxígeno en laboratorio (Alve y Bernhard, 1995), mientras que *A. tepida* puede vivir próxima a puntos de vertido de metales pesados, aguas fecales y otros efluentes químicos y termales (Alve, 1995). En experimentos de laboratorio, estas especies (junto con *C. excavatum* y *Q. seminula*) mostraron actividad tras 24 horas de anoxia, por lo que estos foraminíferos han sido considerados con

capacidad anaeróbica por Moodley y Hess (1992). Los foraminíferos bentónicos usan el oxígeno presente en la interfase sedimento-agua y en el agua de los poros, tienen una pequeña demanda respiratoria de oxígeno y probablemente pueden sobrevivir en el límite inferior del rango de oxígeno (Sen Gupta y Machain-Castillo, 1993). En la Ría de Bilbao, la distribución de estos foraminíferos vivos exhibe un aparente gradiente longitudinal, con un menor número de individuos conforme nos distanciamos de la boca del estuario, sugiriendo un aporte de especímenes continuo desde el mar abierto y un medio hostil dentro del estuario que no permite su proliferación.

Con el fin de distinguir entre la variabilidad intrínseca de estos medios estuarinos y las tendencias temporales inducidas por las variaciones ambientales dentro de las asociaciones de foraminíferos que se encuentran en un medio, es necesario el estudio de series temporales que permitan revelar aspectos importantes del dinamismo de cada biotopo y como se van reduciendo las oportunidades para algunos taxones o creando nuevas expectativas para otros a lo largo del tiempo (Murray 2003).

Las series temporales aportan el mejor medio para registrar cambios ambientales a corto plazo (meses o algunos años) y son esenciales para entender los cambios a medio y largo plazo (décadas y siglos) que están teniendo lugar en un medio determinado (Murray, 2003). Es importante documentar los cambios a corto, medio y largo plazo en medios marinos someros, debido a que éstos están sometidos de manera natural y artificial a grandes variaciones físico-químicas y/o biológicas (Murray, 2000).

En la Ría de Bilbao estamos comenzando a desarrollar una serie temporal (Octubre 1997, Febrero y Abril 1998, Enero, Mayo y Octubre 2000, Febrero y Mayo 2003) que nos permita valorar los cambios ambientales producidos en los últimos años y que están relacionados con las medidas implementadas por las instituciones para regenerar ambientalmente la Ría de Bilbao, y poder asentar así las bases para estandarizar un sistema de control ambiental en el estuario basado en los resultados obtenidos de los análisis químico y micropaleontológico.

El número máximo de individuos vivos encontrados dentro del estuario ha pasado de 18 (muestra 13-Enero 1998) a 112 (muestra 13-Mayo 2000), mientras que en la muestra de la bahía se ha incrementado desde 128 (muestra 14-Enero 1998) a 244

(muestra 14-Mayo 2000). A su vez el número total de especies vivas identificadas ha pasado de 10 durante el muestreo 1997-98 a 17 durante 2000-03, aunque el número máximo de especies encontradas vivas simultáneamente en un punto de muestreo es el mismo (8). En la muestra de la bahía el número de especies vivas ha pasado de 14 en 1997-98 (11 viviendo simultáneamente) a 20 en el último muestreo (12 viviendo simultáneamente). Las especies más recurrentes pasan de ser (por este orden) *B. spathulata*, *A. tepida* y *B. britannica*, junto con *H. germanica* y *Q. seminulum* en la zona inferior del estuario durante el muestreo 1997-98 a *H. germanica*, *Q. seminula*, *A. tepida*, *B. spathulata* y *B. britannica*, junto con *B. gibba* y *B. marginata* en la zona inferior del estuario durante 2000-03. Además, en el estudio de 1997-98 los foraminíferos vivos no alcanzaban ningún punto del estuario superior, mientras que durante 2000 y 2003 las muestras 3, 4 y 5 presentaron algunos caparzones vivos (4, 3 y 2 respectivamente).

El análisis geoquímico de las muestras superficiales de la Ría de Bilbao pone de manifiesto que la distribución de metales pesados en los sedimentos actuales está directamente condicionada por la localización geográfica de las distintas fuentes contaminantes (Capítulo 4). Si bien hay que descartar la ausencia de fenómenos de removilización geoquímica asociados a procesos de diagénesis temprana, éstos pueden haber quedado "enmascarados" por la magnitud de los aportes contaminantes (Irabien, comunicación personal). La variabilidad espacial detectada se hace patente incluso a escala de un solo punto de muestreo. Sin embargo, y a pesar de que la contaminación se distribuya de un modo tan heterogéneo a lo largo del cauce estuarino, la información con la que contamos (muestreos de 1997, 2000 y 2003) nos permiten establecer algunas tendencias generales de la evolución geoquímica:

a) Entre los años 1997 y 2000 se observa un ligero descenso en las concentraciones de metales en la mayor parte de las muestras estudiadas, consecuencia directa de la importante disminución en la calidad de los vertidos que llegan a la ría sin depurar. Por un lado, la crisis industrial de las últimas décadas ha provocado el cierre de una buena parte de las industrias contaminantes que se ubicaban en sus orillas. Por otro lado, las nuevas disposiciones legales para la protección del medio ambiente han llevado a una mejora sustancial de los tratamientos descontaminantes y de la gestión de los residuos urbanos e industriales.

b) Sin embargo, y contrariamente a lo esperado, se ha comprobado que en algunas estaciones de la ría (muestra 10, por ejemplo) las concentraciones de metales aumentaron entre 1997 y 2000. Este hecho parece reflejar las consecuencias de los dragados de limpieza realizados pocos días antes del segundo muestreo geoquímico, y que dieron lugar a la removilización y depósito de importantes cantidades de sedimentos con altos niveles de metales.

c) Las muestras recogidas en el año 2003 presentan concentraciones en metales más bajas que en años anteriores, reflejo de la paulatina mejora que está experimentando el medio como consecuencia de la disminución de la presión humana. Suprimidos la mayor parte de los vertidos, se espera que en el futuro continúe este proceso regenerativo con el depósito continuado de material más limpio.

5.5. Conclusiones

Como consecuencia de su elevada dispersión natural en el medio marino, los foraminíferos bentónicos presentan una gran capacidad para colonizar cualquier ecosistema con un mínimo nivel de salinidad. A pesar de que las especies que han aparecido vivas dentro del estuario son consideradas como formas resistentes a diversos factores contaminantes, tan solo hemos podido encontrar un reducido número de foraminíferos vivos a lo largo de la Ría de

Bilbao durante los últimos 7 años. Esto es debido a que su distribución responde exclusivamente a mecanismos de transporte pasivo desde el mar abierto, descartando la posibilidad de que se estén reproduciendo dentro del estuario.

Estos resultados demuestran que la barrera ecológica descrita en el Capítulo 4 sigue limitando la recolonización de la Ría de Bilbao por parte de los foraminíferos bentónicos. El ligero incremento en el número de especies vivas encontradas en el estuario, la reciente presencia de foraminíferos vivos en la zona superior de la ría y el descenso en las concentraciones de metales pesados de hasta un 50% de su valor en los últimos años, sugieren la posibilidad de una paulatina recolonización satisfactoria, aunque en un plazo de tiempo mayor al abarcado por este estudio. Una vez que las condiciones ambientales mejoren suficientemente en la Ría de Bilbao, estas especies características de medios marino proximales que están entrando continuamente en el estuario como individuos vivos deberían poder recolonizar la ría gracias a su capacidad natural de adaptación a condiciones ambientales estresantes. Por tanto, la monitorización de las asociaciones de foraminíferos bentónicos en los próximos años podría ser potencialmente utilizada con el objetivo de valorar la efectividad de los esquemas de regeneración ambiental que se están llevando a cabo actualmente dentro de los planes estratégicos locales.

Fondo geoquímico de la Ría de Bilbao,																				
% mdn.	Zona superior, 1997 (n=5)		Zona media, 1997 (n=5)		Zona inferior, 1997 (n=3)		Zona superior, 2001 (n=5)		Zona media, 2001 (n=5)		Zona inferior, 2001 (n=3)		Zona superior, 2003 (n=5)		Zona media, 2003 (n=5)		Zona inferior, 2003 (n=2)			
	rango	mdn.	rango	mdn.	rango	mdn.	rango	mdn.	rango	mdn.	rango	mdn.	rango	mdn.	rango	mdn.	rango	mdn.		
Si	21,86	[18,04-27,70]	21,01	[19,02-25,08]	24,66	[21,15-24,79]	21,6	[20,38-22,77]	18,22	[17,17-22,19]	20,06	[16,43-22,34]	17,17	[16,67-18,64]	21,22	[18,61-21,89]	21,28	[15,22-21,63]	20,28	[20,27-20,29]
Al	5,4	[1,30-10,06]	6,9	[6,59-8,38]	6,13	[5,65-7,66]	5,98	[5,97-7,28]	6,71	[4,80-6,98]	6,42	[5,11-7,70]	5,44	[4,31-7,77]	6,39	[5,10-7,10]	6,71	[4,80-6,95]	6,81	[5,34-8,28]
Fe	2,44	[0,90-5,31]	3,79	[3,54-4,73]	4,69	[3,78-9,98]	6,66	[6,40-7,06]	4,3	[2,99-10,79]	4,38	[4,12-9,72]	6,71	[6,52-7,53]	3,13	[3,07-5,41]	3,38	[2,53-7,85]	5,55	[5,05-6,06]
Mn	0,029	[0,014-0,154]	0,032	[0,029-0,043]	0,049	[0,035-0,094]	0,052	[0,038-0,077]	0,048	[0,033-0,117]	0,053	[0,037-0,138]	0,067	[0,046-0,135]	0,056	[0,035-0,061]	0,036	[0,032-0,094]	0,047	[0,041-0,053]
Ti	0,372	[0,129-0,626]	0,41	[0,397-0,466]	0,484	[0,422-0,547]	0,546	[0,476-3,580]	0,462	[0,266-0,590]	0,488	[0,403-0,576]	0,637	[0,507-1,574]	0,458	[0,278-0,480]	0,461	[0,321-0,493]	0,801	[0,532-1,070]
P	0,047	[0,024-0,082]	0,332	[0,196-0,659]	0,247	[0,115-0,388]	0,269	[0,234-0,291]	0,227	[0,183-0,306]	0,249	[0,166-0,371]	0,273	[0,196-0,281]	0,086	[0,079-0,100]	0,13	[0,088-0,261]	0,183	[0,178-0,188]
Ne ₂ O	0,89	[0,33-3,18]	2,57	[2,13-2,85]	2,35	[1,52-2,66]	3,14	[2,17-3,81]	1,18	[0,91-1,87]	1,67	[1,42-1,99]	1,52	[1,21-1,71]	1,14	[0,73-1,23]	1,26	[1,10-1,51]	1,62	[1,53-1,71]
S%	1,176	[0,190-2,667]	1,021	[0,835-1,782]	1,12	[0,741-1,794]	0,989	[0,859-1,456]	0,833	[0,522-2,660]	1,574	[0,987-1,970]	0,925	[0,628-1,631]	0,348	[0,263-0,394]	0,566	[0,386-0,780]	0,554	[0,476-0,631]

elementos traza (mg/kg)																				
As	16	[8-37]	23	[13-52]	76	[37-177]	133	[80-515]	21	[16-129]	64	[48-111]	145	[70-283]	15	[15-18]	49	[17-71]	138	[98-178]
Cr	63	[15-147]	271	[183-1068]	279	[158-338]	207	[198-282]	294	[139-407]	280	[190-576]	245	[215-392]	181	[147-424]	193	[154-422]	209	[200-219]
Cu	19	[9-57]	135	[76-289]	247	[126-585]	286	[205-566]	162	[59-496]	269	[219-398]	220	[191-837]	41	[32-57]	89	[37-183]	214	[131-297]
Ni	20	[8-51]	46	[32-52]	58	[29-74]	44	[38-71]	44	[26-96]	67	[37-109]	37	[32-84]	31	[20-35]	38	[17-75]	35	[24-46]
Pb	22	[10-52]	190	[98-221]	372	[139-689]	426	[294-544]	156	[78-1118]	385	[205-580]	378	[242-795]	55	[45-104]	188	[53-361]	302	[235-369]
Zn	63	[23-105]	678	[487-787]	1358	[459-1888]	1119	[1117-1999]	634	[398-1798]	1211	[708-2192]	1042	[976-4231]	217	[196-238]	659	[149-842]	946	[629-1262]

Tabla 5-1: Composición elemental de la Ría de Bilbao obtenida de los sondeos holocenos y las muestras superficiales en Octubre 1997, Enero 2000 y Febrero 2003. Clave: mdn.: mediana; n: número de casos; rango entre corchetes.

APENDICE 5-A: Relación sistemática de especies de foraminíferos bentónicos identificadas en las muestras superficiales del periodo 2000-03 durante el estudio de seguimiento de la Ría de Bilbao.

1. CAPARAZÓN AGLUTINANTE

- Arenoparrella mexicana* (Kornfeld) =
Trochammina inflata (Montagu) var. *mexicana*
Kornfeld, 1931
- Eggerelloides scaber* (Williamson) = *Bulimina scabra* Williamson, 1858
- Gaudryina rudis* Wright, 1900
- Haplofragmoides wilberti* Andersen, 1953
- Hormosina moniliforme* (Siddall) = *Reophax moniliforme* Siddall, 1886
- Jadammina macrescens* (Brady) = *Trochammina inflata* (Montagu) var. *macrescens* Brady, 1870
- Miliammina fusca* (Brady) = *Quinqueloculina fusca* Brady, 1870
- Reophax scottii* Chaster, 1892
- Spirorritilis wrightii* (Silvestri) = *Spiroplecta wrightii* Silvestri, 1903
- Textularia earlandi* Parker, 1952
- Textularia saggitula* DeFrance, 1824
- Trochammina inflata* (Montagu) = *Nautilus inflatus* Montagu, 1808
- Triphotrocha comprimata* (Cushman & Brönniman) = *Trochammina compromata* Cushman and Brönniman, 1948
- Trochammina ochracea* (Williamson) = *Rotalina ochracea* Williamson, 1858

2. CAPARAZÓN PORCELANÁCEO

- Adelosina laevigata* d'Orbigny, 1826
- Cornuspira involvens* (Reuss) = *Operculina involvens* Reuss, 1850
- Massilina secans* (d'Orbigny) = *Quinqueloculina secans* d'Orbigny, 1826
- Miliolinella subrotunda* (Montagu) = *Vermiculum subrotundum* Montagu, 1803
- Pateoris hauerinoides* (Rhumbler) = *Quinqueloculina subrotunda* (Montagu) var. *hauerinoides* Rhumbler, 1936
- Quinqueloculina berthelotiana* d'Orbigny, 1839
- Quinqueloculina bicornis* (Walker and Jacob) = *Serpula bicornis* Walker and Jacob, 1798
- Quinqueloculina dimidiata* Terquem, 1876

- Quinqueloculina lata* Terquem, 1876
- Quinqueloculina quadrata* Nörvang, 1945
- Quinqueloculina rugosa* d'Orbigny, 1852
- Quinqueloculina seminula* (Linné) = *Serpula seminulum* Linné, 1758
- Quinqueloculina undulata* d'Orbigny, 1826
- Triloculina bermudezi* Acosta, 1940
- Triloculina trigonula* (Lamarck) = *Miliolites trigonula* Lamarck, 1804

3. CAPARAZÓN HIALINO

- Ammonia tepida* (Cushman) = *Rotalina tepida* (Linné) var. *tepida* Cushman, 1927
- Asterigerinata mamilla* (Williamson) = *Rotalina mamilla* Williamson, 1858
- Aubignyna hamblensis* Murray, Whittaker and Alve, 2000
- Bolivina pseudoplicata* Heron-Allen and Earland, 1930
- Bolivinellina pseudopunctata* (Höglund) = *Bolivina pseudopunctata* Höglund, 1947
- Brizalina spathulata* (Williamson) = *Textularia variabilis* Williamson var. *spathulata* Williamson, 1858
- Bulimina elongata* d'Orbigny, 1846
- Bulimina gibba* Fornasini, 1902
- Bulimina marginata* d'Orbigny, 1826
- Buliminella elegantissima* (d'Orbigny) = *Bulimina elegantissima* d'Orbigny, 1839
- Cassidulina obtusa* Williamson, 1858
- Cibicides lobatulus* (Walker and Jacob) = *Nautilus lobatulus* Walker and Jacob, 1798
- Criboelphidium excavatum* (Terquem) = *Polystomella excavata* Terquem, 1875
- Criboelphidium oceanensis* (d'Orbigny) = *Polystomella oceanensis* d'Orbigny, 1826
- Criboelphidium williamsoni* (Haynes) = *Elphidium williamsoni* Haynes, 1973
- Elphidium crispum* (Linné) = *Nautilus crispus* Linné, 1758
- Elphidium incertum* (Williamson) = *Polystomella umbilicatula* var. *incerta* Williamson, 1858
- Elphidium magellanicum* Heron-Allen and Earland, 1932
- Elphidium margaritaceum* (Cushman) = *Elphidium advenum* (Cushman) var. *margaritaceum* Cushman, 1930

Fissurina marginata (Montagu) = *Vermiculum marginatum* Montagu, 1803

Florilus pauperatus (Balkwill and Wright) = *Nonionina pauperata* Balkwill and Wright, 1885

Fursenkoina fusiformis (Williamson) = *Bulimina pupoides* d'Orbigny var. *fusiformis* Williamson, 1858

Gavelinopsis praegeri (Heron-Allen and Earland) = *Discorbina praegeri* Heron-Allen and Earland, 1913

Globulina sp.

Haynesina depressula (Walker and Jacob) = *Nautilus depressulus* Walker and Jacob, 1798

Haynesina germanica (Ehrenberg) = *Nonionina germanica* Ehrenberg, 1840

Hyalinea balthica (Schröter) = *Nautilus balthicus* Schröter, 1783

Lagena clavata (d'Orbigny) = *Oolina clavata* d'Orbigny, 1846

Laryngosygma lactea (Walker and Jacob) = *Serpula lactea* Walker and Jacob, 1798

Oolina hexagona (Williamson) = *Entosolenia squamora* (Montagu) var. *hexagona* Williamson, 1848

Planorbulina mediterranensis d'Orbigny, 1826

Rosalina anomala Terquem, 1875

Rosalina irregularis (Rhumbler) = *Discorbina irregularis* Rhumbler, 1906

Spirillina vivipara Ehrenberg, 1843

Svratkina sp.

Trifarina angulosa (Williamson) = *Uvigerina angulosa* Williamson, 1958



6. Conclusiones

En este trabajo, se han analizado inicialmente las asociaciones de foraminíferos contenidas en las sucesiones sedimentarias de nueve sondeos holocenos perforados en las zonas media e inferior de la Ría de Bilbao. La interpretación paleoambiental de estas asociaciones y otras estudiadas previamente en este mismo estuario (Cearreta, 1998) definen este relleno sedimentario como una secuencia deposicional eustática de cuarto orden en el sentido definido por Vail *et al.* (1991). Esta secuencia sedimentaria comprende un amplio rango de asociaciones de foraminíferos que se organizan en tres cortejos sedimentarios según definen Allen y Posamentier (1993). Cada cortejo sedimentario está compuesto por diferentes conjuntos de asociaciones de foraminíferos, separadas por superficies estratigráficas continuas que constituyen unos buenos marcadores para la correlación.

Esquemáticamente, la estructura del complejo relleno sedimentario de la Ría de Bilbao es la siguiente: en la base, gravas y arenas de grano grueso, de origen fluvial, con ausencia casi total de foraminíferos, que representan unas condiciones de nivel del mar bajo durante la época Tardiglaciario (cortejo de nivel del mar bajo- LST). Durante la transgresión marina (8500-3000 años cal BP), estos depósitos de grano grueso quedaron atrapados en las zonas media y superior del estuario por la migración de los depósitos estuarinos hacia tierra, mientras que en el estuario inferior los materiales que formaban el LST fueron retrabajados e incluidos dentro del cortejo sedimentario transgresivo (TST). Se depositaron grandes volúmenes de sedimento durante el TST en el estuario inferior, principalmente de carácter marino-proximal, mientras que la zona media los sedimentos presentan intercalaciones entre materiales salobres y marino-proximales, y en el estuario superior sólo se depositaron materiales salobres. La parte final del TST está representada por sedimentos marinos (con predominio de foraminíferos exóticos) entre las superficies de *ravinement* (TRS) por debajo, y la superficie de máxima inundación (MFS) por encima. El cortejo sedimentario de nivel de mar alto (HST), depositado durante el Holoceno superior (desde 3000 años cal BP hasta la ocupación humana del siglo XIX), se caracteriza por unas condiciones intermareales y supramareales salobres correspondientes a un relleno posterior a la estabilización del nivel del mar.

Esta esquema general permite englobar los resultados obtenidos en otras secuencias sedimentarias costeras estudiadas en el Golfo de Bizkaia

que muestran como, siguiendo el ascenso postglaciario del nivel marino, los estuarios actuales en la región comienzan a desarrollarse a partir de los 8500 años BP. Además, una segunda secuencia de somerización comienza hace 3000 años BP cuando el nivel del mar alcanza una posición similar a la actual, después de un último evento transgresivo datado en esa época.

Originalmente la principal asociación indígena de foraminíferos en la Ría de Bilbao ha estado formada por *A. tepida/H. germanica*, indicadora de ambientes intermareales y salobres (asociada con *C. oceanensis* en sedimentos fangosos o *C. williamsoni* en sedimentos arenosos), de ambientes marino proximales (junto con *B. britannica/B. pseudoplicata*), o de ambientes de marisma baja (asociada con *J. macrescens/T. inflata/A. mexicana*). La principal asociación exótica en este estuario ha estado dominada por *C. lobatulus* junto con otros taxones epifaunísticos fijos (*R. anomala* o *R. irregularis*) o con formas de vida libre (*M. secans*), todas ellas indicativas de áreas fuente en mar abierto.

Sin embargo, esta situación natural va a sufrir una profunda transformación humana a partir del siglo XIX. El análisis de seis sondeos perforados en las llanuras mareales de la Ría actual de Bilbao refleja el extenso y potente registro sedimentario de los aportes antropogénicos contaminantes. Estos aportes han provocado la desaparición de la microfauna indígena debido a la significativa contaminación de los sedimentos. Es posible diferenciar tres zonas en el registro sedimentario reciente. La zona inferior, en la que se reflejan las condiciones estuarinas pre-industriales, está caracterizada por asociaciones de foraminíferos diversas y abundantes, y un nivel de metales pesados similar o inferior al nivel de fondo geoquímico local. La zona intermedia, zona industrial antigua (periodo 1850-1950), está caracterizada por altas concentraciones de metales en el estuario pero que permitieron la presencia de asociaciones de foraminíferos relativamente abundantes. Sin embargo, la zona superior o zona industrial reciente (periodo 1950-2000) está caracterizada por la desaparición total de las asociaciones de foraminíferos indígenas, causada por unos niveles de oxígeno mínimos durante este intervalo temporal. Estas dos últimas zonas constituyen el registro sedimentario del periodo industrial. Los sedimentos han demostrado ser un gran almacén de contaminantes y foraminíferos.

La comparación entre las condiciones originales y las características micropaleontológicas recientes

muestra que, al menos durante los últimos 8500 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 y directamente al estuario, han provocado un cambio dramático en las características químicas de los sedimentos y la total eliminación de la microfauna característica. Un amplio rango de elementos químicos presentan concentraciones fuertemente enriquecidas en los sedimentos intermareales. Todos los caparazones de foraminíferos bentónicos identificados en el registro sedimentario de los últimos 50 años han sido introducidos por las corrientes mareales dentro del estuario como partículas sedimentarias desde el mar abierto.

Hoy en día, la presencia en las muestras superficiales de la Ría de Bilbao de algunos foraminíferos vivos transportados (capaces de sobrevivir durante un cierto período de tiempo, pero incapaces de reproducirse dentro del estuario), y cuyas especies han sido identificadas como dominantes en otros medios estuarinos de la misma costa cantábrica y en el propio estuario original de Bilbao, sugiere la posibilidad de una recolonización satisfactoria de

las zonas defaunadas, una vez que las condiciones ambientales mejoren suficientemente. En base a su accesibilidad, se ha establecido una red de muestreo, diseminada longitudinalmente respecto al eje central de la Ría, que consta de 13 puntos internos y una muestra de referencia en el Abra. El estudio de seguimiento llevado a cabo en las muestras superficiales desde Octubre 1997 hasta Mayo 2003, permite observar una sensible mejoría en los niveles de contaminación de los sedimentos, donde las concentraciones en metales pesados han descendido una media de 50%.

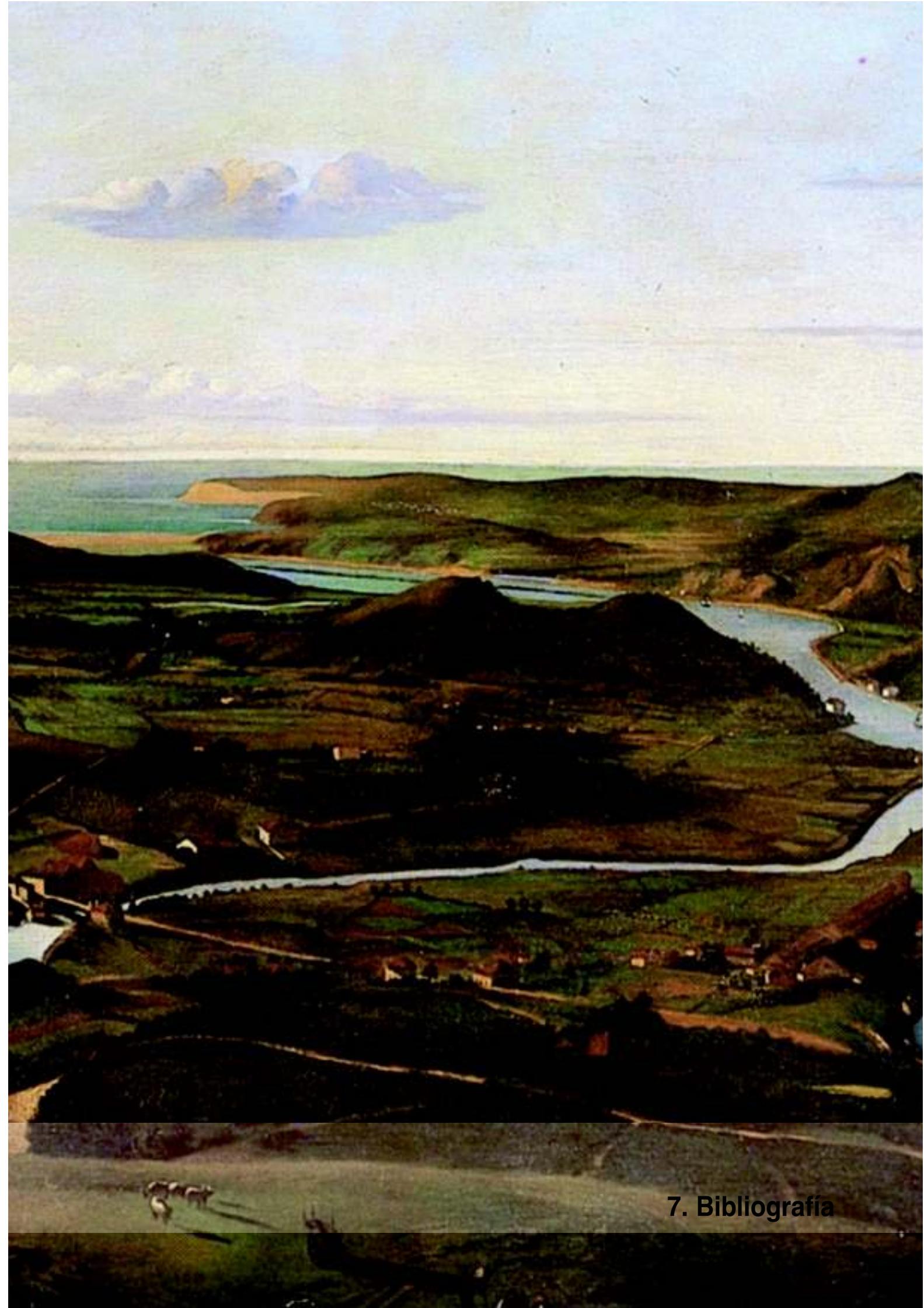
Lamentablemente, las observaciones microfau-nísticas no nos permiten ser aún optimistas, ya que la naturaleza y estructura de las asociaciones de foraminíferos actuales en la Ría de Bilbao sigue siendo muy deficiente. En consecuencia, la microfauna puede ser utilizada como una herramienta para determinar la efectividad a lo largo del tiempo del programa de regeneración ambiental impulsado por las instituciones locales.

Este trabajo micropaleontológico que identifica y reconstruye las principales etapas de la transformación ambiental de la Ría de Bilbao durante el Holoceno, está basado en el estudio de unos 140000 especímenes de foraminíferos bentónicos, agrupados en 140 especies diferentes (Apéndice 6-A) y extraídos de un total de 764 muestras de sedimento analizadas.

APENDICE 6-A: Relación sistemática de todas especies de foraminíferos bentónicos identificadas en las diferentes muestras analizadas en la Ría de Bilbao. Entre paréntesis se indica su distribución espacial, basada en la división descrita en la Figura 1-6 y su distribución temporal, en función del tipo de muestras en las que han aparecido. Clave: HM: muestras holocenas del estuario medio; HI: muestras holocenas del estuario inferior; HB: muestras holocenas de la bahía; IS: muestras industriales del estuario superior; IM: muestras industriales del estuario medio; II: muestras industriales del estuario inferior; VS: foraminíferos vivos encontrados en el estuario superior; VM: foraminíferos vivos encontrados en el estuario medio; VI: foraminíferos vivos encontrados en el estuario inferior; VB: foraminíferos vivos encontrados en la bahía; M: caparazones presentes en las muestras superficiales del estuario.

- Acervulina inhaerens* (HM, HI, HB, IM, II)
Acervulina sp. (HM, HI, HB, IM, II)
Adelosina cliarensis (HM, HI, HB, IM, II)
Adelosina laevigata (HM, HI, HB, IM, M, VB)
Adelosina sp. (HI)
Adelosina striata (HI, HB)
Ammonia tepida (HM, HI, HB, IS, IM, II, M, VS, VM, VI, VB)
Amphicoryna scalaris (HI)
Anomalina sp. (IS)
Arenoparrella mexicana (HM, HI, HB, IS, IM, M)
Astacolus crepidulus (HI, HB, IM, M)
Asterigerinata mamilla (HI, HB, IS, IM, II, M)
Aubignyna hamblensis (HI, HB, IM, VB)
Bolivina pseudoplicata (HM, HI, HB, IS, IM, II, M)
Bolivinellina pseudopunctata (HI, HB, IS, IM, II, M)
Brizalina britannica (HM, HI, HB, IS, IM, II, M, VS, VM, VI, VB)
Brizalina difformis (HM, HI, HB, IS, IM, II)
Brizalina sp. (HM, HI, IS, IM)
Brizalina spathulata (HM, HI, HB, IS, IM, II, M, VM, VI, VB)
Brizalina variabilis (HM, HI, HB, IS, IM, II, M, VI)
Bulimina alazanensis (HM, HI, HB)
Bulimina costata (IM, M)
Bulimina elongata (HM, HI, HB, IS, IM, II, M, VI, VB)
Bulimina gibba (HM, HI, HB, IS, IM, II, M, VI, VB)
Bulimina marginata (HM, HI, HB, M, VI, VB)
Buliminella elegantissima (HM, HI, HB, IM, II, M, VM, VI)
Cancris auricula (HM, HI, HB, IM)
Cancris oblongus (HI)
Cassidulina carinata (HI, IS, IM, II)
Cassidulina crassa (HM, HI)
Cassidulina obtusa (HM, HI, HB, IS, IM, II, M, VB)
Cassidulina sp. (IM)
Cibicides lobatulus (HM, HI, HB, IS, IM, II, M, VB)
Cibicides sp. (HI)
Cornuspira involvens (HI, HB, IM, M, VM)
Cribrostomoides jeffreysii (IM)
Cribrorhynchium earlandi (HM, HI, HB, M)
Cribrorhynchium excavatum (HM, HI, HB, IS, IM, II, M)
Cribrorhynchium gerthi (HM, HI, HB)
Cribrorhynchium oceanensis (HM, HI, HB, IS, IM, II, M, VB)
Cribrorhynchium williamsoni (HM, HI, HB, IS, IM, II, M)
Eggerelloides scaber (HM, HI, HB, IM, II, M)
Elphidium crispum (HM, HI, HB, IS, IM, II, M)
Elphidium incertum (HM, HI, HB, IM, M)
Elphidium macellum (HM, HI, HB, IS, IM, II)
Elphidium magellanicum (HI, HB, M)
Elphidium margaritaceum (HM, HI, IS, IM, M)
Elphidium sp. (HI, HB)
Epistominella vitrea (IM, II)
Fissurina lucida (HM, HI, HB, IS, IM, II)
Fissurina marginata (HM, HI, HB, IS, IM, II, M)
Fissurina orbygniana (HM, HI, HB, IM, II)
Fissurina sp. (HI, IM)
Florilus pauperatus (HM, HI, HB, IS, IM, II, M)
Fursenkoina fusiformis (HM, HI, HB, M, VI)
Gaudryina rudis (HM, HI, HB, IM, II, M)
Gavelinopsis praegeri (HM, HI, HB, IM, II, M)
Glabratella millettii (HM, HI, HB, IS, IM, II)
Globulina gibba (HI, HB, M)
Globulina sp. (IM, M)
Haplofragmoides wilberti (IM, II, M)
Haynesina depressula (HM, HI, HB, IS, IM, II, M)
Haynesina germanica (HM, HI, HB, IS, IM, II, M, VM, VI, VB)
Haynesina sp. (IM)
Hormosina moniliforme (M, VI)
Hyalinea balthica (HM, HI, M)
Jadammina macrescens (HI, HB, IS, IM, II, M, VI)
Lagena clavata (HM, HI, HB, IM, M)

- Lagena laevis* (HI)
Lagena perlucida (HM, HI, HB, IM)
Lagena semistriata (HI)
Lagena sp. (HB)
Lagena striata (HM, HI, IM)
Lagena sulcata (HM, HI, HB, II, M)
Lamarckina haliotidea (HM, HI, HB, IS, IM, II)
Laryngosyigma lactea (HM, HI, HB, IM, M)
Lenticulina gibba (HM)
Lenticulina inortatus (IM, M)
Lenticulina sp. (HB)
Massilina secans (HM, HI, HB, IS, IM, II, M, VB)
Melonis pompilioides (II)
Miliammia fusca (IS, M, VM)
Miliolinella sp. (M)
Miliolinella striata (HM, HI, HB, IM, II)
Miliolinella subrotunda (HM, HI, HB, IM, II, M, VB)
Nonionella atlantica (HI, IM, II)
Nonionella turgida (HM, HI, HB)
Oolina hexagona (HI, HB, M)
Oolina melo (HM, HI, HB, M)
Oolina squamosa (HM, HI, HB, M)
Patellina corrugata (HM, HB)
Pateoris hauerinoides (HM, HI, HB, M)
Planorbulina mediterraneensis (HM, HI, HB, IM, II, M)
Pyrgo depressa (HB)
Quinqueloculina aspera (IM)
Quinqueloculina auberiana (HI, II)
Quinqueloculina berthelotiana (HI, HB, M)
Quinqueloculina bicornis (HM, HI, HB, IM, II, M, VB)
Quinqueloculina costata (HI, IM)
Quinqueloculina dimidiata (HM, HI, HB, IM, II, M)
Quinqueloculina irregularis (HB)
Quinqueloculina jugosa (HI, IM)
Quinqueloculina laevigata (HM)
Quinqueloculina lata (HM, HI, HB, IS, IM, II, M, VI)
Quinqueloculina mediterraneensis (HI)
Quinqueloculina oblonga (HM, HI, HB, IM, II, M)
Quinqueloculina quadrata (HM, HI, HB, IM, II, M, VB)
Quinqueloculina rugosa (HB, II)
Quinqueloculina seminula (HM, HI, HB, IS, IM, II, M, VM, VI, VB)
Quinqueloculina sp. (HM, HI, HB, IS, IM)
- Quinqueloculina undulata* (HB, M)
Quinqueloculina vulgaris (HB)
Reophax scottii (M)
Rosalina anomala (HM, HI, HB, IS, IM, II, M, VI, VB)
Rosalina globularis (HM, HI, HB)
Rosalina irregularis (HM, HI, HB, IS, IM, II, M, VB)
Rosalina sp. (IM)
Spirillina vivipara (HM, HI, HB, IM, II, M)
Spiroloculina depressa (HM, HI, HB, IM, II)
Spiroloculina excavata (HI, HB, IM)
Spiroloculina nitida (HI, HB)
Spiroloculina sp. (HI)
Spirorruttilis wrightii (HM, HI, HB, IM, II, M, VB)
Stainforthia fusiformis (HM, HI)
Svartkina sp. (HI, HB, M)
Textularia bocki (HI, HB, IM, II, M)
Textularia earlandi (HB, IM, VI)
Textularia saggitula (HI, HB, M)
Textularia sp. (HM, HI, IM)
Textularia truncata (HM, HI, HB, IM, II, M, VB)
Trifarina angulosa (HM, HI, HB, IM, II, M)
Trifarina bradyi (HM, HI, HB)
Triloculina bermudezi (HI, HB, IS, IM, II, M, VB)
Triloculina trigonula (HM, HI, HB, IM, II, M, VB)
Tiphotrocha comprimata (IS, M)
Trochammia inflata (HM, HI, HB, IS, IM, II, M, VM)
Trochammia ochracea (HM, M)
Uvigerina compressa (HM, IM, M)
Uvigerina peregrina (HM, HI, HB, IM)
Uvigerina pygmaea (IS, IM, II)



- ALLEN, G.P. Y POSAMENTIER, H.W.
1993 Sequence stratigraphy and facies model of an incised valley fill: The Gironde Estuary, France. *Journal of Sedimentary Petrology*, 63, 378-391.
- ALMUNIA, J.
1975 Antigua industria del Hierro. *Colección Temas Vizcaínos*, 12, 1-52. Caja de Ahorros Vizcaína, Bilbao.
- ALVE, E.
1990 Variation in estuarine foraminiferal with diminishing oxygen conditions in Drammensfjord, SE Norway, En: Hemleben et al. (Eds.), *Paleoecology, Biostratigraphy, Paleoceanography and Taxonomy of Agglutinated Foraminifera*, Kluwer Academic Publishers, 661-694.
- ALVE, E.
1991a Foraminifera, climatic change, and pollution: a study of late Holocene sediments in Drammensfjord, southeast Norway. *The Holocene*, 1, 243-261.
- ALVE, E.
1991b Benthic foraminifera in sediment cores reflecting heavy metal pollution in Sørfjord, western Norway. *Journal of Foraminiferal Research*, 21, 1-19.
- ALVE, E.
1995 Benthic foraminiferal responses to estuarine pollution: a review. *Journal of Foraminiferal Research*, 25, 190-203.
- ALVE, E.
1999 Colonization of new habitats by benthic foraminifera: a review. *Earth Science Review*, 46, 167-185.
- ALVE, E. Y BERNHARD, J.M.
1995 Vertical migratory response of benthic foraminifera to controlled oxygen concentrations in an experimental mesocosm. *Marine Ecology Progress Series*, 116, 137-151.
- ALVE, E. Y MURRAY, J.W.
1999 Marginal marine environments of Skagerrak and Kattegat: a baseline study of living (stained) benthic foraminiferal ecology. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 146, 171-193.
- AUTORIDAD PORTUARIA DE BILBAO
1999-2000 Proyecto Integral de Regeneración Medioambiental de la Ría de Bilbao. 6 volúmenes, Inédito.
- BENO, A.A. Y GIBBS, R.
1990 Mechanisms of pollution transport in the Hudson estuary. *Science of the Total Environment*, 97/98, 9-22.
- BERNER, R.A.
1984 Sedimentary pyrite formation: an update. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 48, 606-616.
- BERNHARD, J.M.
1992 Benthic foraminiferal distribution and biomass related to pore-water oxygen content: central California continental slope and rise. *Deep-Sea Research I*, 39, 585-605.
- BILBAO, G. Y LAMOLDA, M.A.
1979 Resultados preliminares del estudio de los foraminíferos del litoral vizcaíno. *Actas del 1º Simposio Ibérico de Bentos Marino*, 1-16.
- BILBAO-RÍA 2000
2003 Una Ría acorde con el nuevo Bilbao. <http://www.BilbaoRia2000.es/>.
- BOLDRIN, A.; JURACIÇ, M.; MENEGAZZO VITTURI, L.; RABITTI, S. Y RAMPAZZO, G.
1989 Geochemical considerations on trace element distributions in suspended matter and sediments at the river-sea interface, Adige River mouth, northern Adriatic sea. *Applied Geochemistry*, 4, 409-421.
- BUCK, K.F., OLSON, H.C. Y AUSTIN, J.A.
1999 Palaeoenvironmental evidence for latest Pleistocene sea-level fluctuations on the New Jersey outer continental shelf: combining high-resolution sequence stratigraphy and foraminiferal analysis. *Marine Geology*, 154, 287-304.
- CAO, Y.; WILLIAMS, D. Y WILLIAMS, N.E.
1998 How important are rare species in aquatic community ecology and bioassessment? *Limnology and Oceanography*, 43, 1403-1409.
- CEARRETA, A.
1983 Los foraminíferos bentónicos actuales en la Ría de Santoña. Tesis de Licenciatura, Universidad del País Vasco/EHU, 1-59, Inédita.
- CEARRETA, A.
1986 *Distribution and ecology of benthic foraminifera in the Rias of Santoña and San Vicente de la Barquera*. Memoria de Tesis Doctoral, University of Exeter (UK), 1-307, Inédita.
- CEARRETA, A.
1988 Distribution and ecology of benthic foraminifera in the Santoña estuary, Spain. *Revista Española de Paleontología*, 21, 23-38.

- CEARRETA, A.
1989 Foraminiferal assemblages in the Ría of San Vicente de la Barquera (Cantabria, Spain). *Revista Española de Paleontología*, 3, 67-80.
- CEARRETA, A.
1992a Cambios medioambientales en la Ría de Bilbao durante el Holoceno. *Cuadernos de la Sección de Historia de Eusko Ikaskuntza*, 20, 435-454.
- CEARRETA, A.
1992b El Puerto de Bilbao y el medio natural en El Abra del Nervión. *Bizia*, 10, 20-25.
- CEARRETA, A.
1992c Palaeoenvironmental interpretation of Holocene coastal sequences in the southern Bay of Biscay. *Geologische Rundschau*, 82, 234-240.
- CEARRETA, A.
1992d Ecoestratigrafía (foraminíferos bentónicos) del relleno estuarino holoceno en el litoral vasco (Golfo de Bizkaia). *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*, 98, 243-266.
- CEARRETA, A.
1994 Análisis micropaleontológico e interpretación paleoecológica del relleno sedimentario holoceno en el estuario del Bidasoa (Golfo de Bizkaia). *Geobios*, 27, 271-283.
- CEARRETA, A.
1998 Holocene sea-level change in the Bilbao estuary (north Spain): foraminiferal evidence. *Micropaleontology*, 44, 265-276.
- CEARRETA, A. Y LEORRI, E.
2000 La transformación ambiental reciente de la Ría de Bilbao: indicadores micropaleontológicos en el registro sedimentario estuarino. *Naturalia Cantabrigiae*, 1, 21-31.
- CEARRETA, A. Y MURRAY, J.W.
1996 Holocene paleoenvironmental and relative sealevel changes in the Santoña estuary, Spain. *Journal of Foraminiferal Research*, 26, 289-299.
- CEARRETA, A. Y MURRAY, J.W.
2000 AMS 14C dating of Holocene estuarine deposits: consequences of high-energy and reworked foraminifera. *The Holocene*, 10, 155-159.
- CEARRETA, A., IRABIEN, M.J., LEORRI, E., YUSTA, I., CROUDACE, I.W. Y CUNDY, A.B.
2000 Recent anthropogenic impacts on the Bilbao estuary, northern Spain: geochemical and microfaunal evidence. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 50, 571-592.
- CEARRETA, A., IRABIEN, M. J., LEORRI, E., YUSTA, I., QUINTANILLA, A. Y ZABALETA, A.
2002a Environmental transformation of the Bilbao estuary, N. Spain: microfaunal and geochemical proxies in the recent sedimentary record. *Marine Pollution Bulletin*, 44, 487-503.
- CEARRETA, A.; IRABIEN, M. J.; ULIBARRI, I.; YUSTA, I.; CROUDACE, I. W.; Y CUNDY, A. B.
2002b Recent salt marsh development and natural regeneration of reclaimed areas in the Plentzia estuary, N. Spain. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 54, 863-886.
- CEDEX
1994 *Recomendaciones para la gestión del material dragado en los puertos españoles*. Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, Madrid.
- CHAPMAN, P.M. Y LONG, E.R.
1983 The use of bioassays as part of a comprehensive approach to marine pollution assessment. *Marine Pollution Bulletin*, 14, 81-84.
- CLAVÉ, B., MASSÉ, L., CARBONEL, P. Y TASTET, J.-P.
2001 Holocene coastal changes and infilling of the La Perroche marsh (French Atlantic coast). *Oceanologica Acta*, 24, 377-389.
- COLLINS, E.S.; SCOTT, D.B.; GAYES, P.T. Y MEDIOLI, F.S.
1995 Foraminiferal in Winyah Bay and north inlet marshes, South Carolina: Relationship to local pollution sources. *Journal of Foraminiferal Research*, 25, 212-223.
- COLOM, G.
1935 Las especies de la familia Peneroplidae actuales y fósiles de las Baleares. *Boletín de la Sociedad Española de Historia Natural*, 35, 1-83.
- COLOM, G.
1941 Foraminíferos de las costas vascas y de la Ría de Marín. *Notas y Resúmenes del Boletín del Instituto Español de Oceanografía*, 96, 1-36.
- COLOM, G.
1942 Una contribución al conocimiento de los foraminíferos de la bahía de Palma de Mallorca. *Notas y Resúmenes del Boletín del Instituto Español de Oceanografía*, 108, 1-53.
- COLOM, G.
1950 Estudio de los foraminíferos de muestras de fondo recogidas entre los cabos de Juby y Borjador. *Boletín del Instituto Español de Oceanografía*, 28, 1-45.

- COLOM, G.
1952 Foraminíferos de las costas de Galicia (Campañas del Xauen en 1949 y 1950). *Boletín del Instituto Español de Oceanografía*, 51, 1-58.
- COLOM, G.
1963 Los foraminíferos de la Ría de Vigo. *Investigación Pesquera*, 23, 71-89.
- COLOM, G.
1964 Sedimentación costera balear (Mallorca y Menorca). *Memoria Académica de Ciencia y Arte de Barcelona*, 39, 495-500.
- COLOM, G.
1970 Estudio de los foraminíferos de muestras de fondo de Barcelona. *Investigación Pesquera*, 34, 355-384.
- COLOM, G.
1974 *Foraminíferos ibéricos*. Investigación Pesquera, 1-245, Barcelona.
- CONSORCIO DE AGUAS
1989 *Chequeo y afino del modelo matemático del estuari del Nervión y para el seguimiento del estudio oceanográfico del Abra y su entorno (1988)*. 2 volúmenes y 4 anexos, Bilbao, Inédito.
- CROUDACE, I.W. Y CUNDY, A.B.
1995 Heavy metal and hydrocarbon pollution in recent sediments from Southampton Water, southern England: a geochemical and isotopic study. *Environmental Science and Technology*, 29, 1288-1296.
- CRUZ-SANJULIAN, J.J.; GARCÍA, J. Y PUJALTE, V.
1984 Las playas de los estuarios de Vizcaya: su dinámica y alteraciones antropogénicas. *Thalassas*, 2, 35-42.
- CULVER, S.J. Y BANNER, F.T.
1978 Foraminiferal assemblages as Flandrian palaeoenvironmental indicators. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 24, 53-72.
- CUNDY, A.B., CROUDACE, I.W., CEARRETA, A. E IRABIEN, M.J.
2003 Reconstructing historical trends in metal input in heavily-disturbed, contaminated estuaries: studies from Bilbao, Southampton Water and Sicily. *Applied Geochemistry*, 18, 311-325.
- CUNDY, A.B., CROUDACE, I.W., THOMSON, J. Y LEWIS, J.T.
1997 Reliability of salt marshes as "geochemical recorders" of pollution input: a case study from contrasting estuaries in southern England. *Environmental Science and Technology*, 31, 1093-1101.
- DAOUST, R.J., MOORE, T.R., CHMURA, G.L. Y MAGENHEIMER, J.F.
1996 Chemical evidence of environmental changes and anthropogenic influences in a bay of Fundy saltmarsh. *Journal of Coastal Research*, 12, 520-533.
- DEBENAY, J-P.
1987 Les ecosystems paraliques du Senegal. Description, repartition des peuplements de foraminifères benthiques. *Revue de Paléobiologie*, 6, 229-255.
- DEBENAY, J-P.; TSAKIRIDIS, E.; SOULARD, R. Y GROSSEL, H.
2001 Factors determining the distribution of foraminiferal assemblages in Port Joinville Harbor (Ile d'Yeu, France): the influence of pollution. *Marine Micropaleontology*, 43, 75-118.
- DEBENAY, J-P.; PAWLOWSKI, J. Y DECROUDEZ, D.
1996 *Les foraminifères actuelles*. Masson, 1-329, Paris.
- DELAUNE, R.D., PATRICK, JR. W.H. Y BURESH, R.J.
1978 Sedimentation rates determined by ¹³⁷Cs dating in a rapidly accreting salt marsh. *Nature*, 275, 532-533.
- DIOT, M.-F. Y TASTET, J.-P.
1995 Paleo-environnements holocenes et limites chrono-climatiques enregistrés dans un marais estuarien de la Gironde (France). *Quaternaire*, 6, 63-75.
- DIPUTACION FORAL DE BIZKAIA
1990 *Puntos de interés geológico de Bizkaia*. Gráficas Rontegi, 1-270, Bilbao.
- ELLISON, R.L., BROOME, R. Y OGILVIE, R.
1986 Foraminiferal response to trace metal contamination in the Patapsco River and Baltimore Harbour, Maryland. *Marine Pollution Bulletin*, 17, 419-423.
- FAIRBANKS, R.G.
1989 A 17,000-year glacio-eustatic sea level record: influence of glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep-ocean circulation. *Nature*, 342, 637-642.
- FISHER, R.A., CORBETT, A.S. Y WILLIAMS, C.B.
1943 The relationship between the number of species and the number of individuals in a random sample of an animal population. *Journal of Animal Ecology*, 12, 42-58.
- FOUCAULT, A. Y RAOULT, J.F.
1985 *Diccionario de Geología*. Masson, 1-316, Barcelona.
- GARCÍA-GARMILLA, F.
1990 Diagénesis de las arenitas: ejemplos del Cretácico, Terciario y Cuaternario de la zona de Bilbao. *Kobie*, 19, 85-103.

- GARCÍA-MERINO, L.V.
1981 Ria, Puerto exterior, Superpuerto. Tres etapas en la proyección de Bilbao hacia el mar. *Lurralde*, 4, 129-165.
- GARCÍA-MERINO, L.V.
1987 *La formación de una ciudad industrial. El despegue urbano de Bilbao*. Instituto Vasco de la Administración Pública, 1-844, Bilbao.
- GONZÁLEZ OREJA, J.A.
1999 *Ecología de la recuperación de la Ría de Bilbao*. Memoria de Tesis Doctoral. Universidad del País Vasco/EHU, 1-287, Inédita.
- GOROSTIAGA, J.M. Y DÍEZ, I.
1996 Changes in sublittoral benthic marine macroalgae in the polluted area of Abra de Bilbao and proximal coast (Northern Spain). *Marine Ecology Progress Series*, 130, 157-167.
- GREENPEACE
1991 *Verter con otro nombre*. Grafisch Centrum, 1-68, Amsterdam.
- GREINER, G.O.G.
1969 Recent benthonic foraminifera; environmental factors controlling their distribution. *Nature*, 223, 168-170.
- GREINER, G.O.G.
1974 Environmental factors controlling the distribution of recent benthonic foraminifera. *Breviora*, 420, 1-35.
- GUERRERO, J.; RODRIGUEZ, C. Y JORNET, A.
1988 Estudio de metales pesados en aguas y sedimentos superficiales en las costas cantábrica y gallega. *Informes Técnicos del Instituto Español de Oceanografía*, 64, 1-16.
- HAYEK, L.C. Y BOUZAS, M.A.
1997 *Surveying natural populations*. Columbia University Press. 1-563. New York.
- HAZERA, J.
1968 La region de Bilbao et son arrière-pays: Etude géomorphologique. *Munibe*, 20, 1-358.
- HAZERA, J.
1977 Historia de la Ría de Bilbao en la Era Cuaternaria. *Colección Temas Vizcaínos*, 25, 1-54. Caja de Ahorros Vizcaína, Bilbao.
- HERNÁNDEZ PACHECO, F. Y ASENSIO AMOR, I.
1966 Estudio fisiográficosedimentológico de la ría de Guernica. *Boletín del Instituto Español de Oceanografía*, 25, 1-29
- IGME
1986 *Estudio geológico para la previsión de riesgos por inundaciones en el País Vasco (Alava y Vizcaya) y Condado de Treviño, E: 1:100000*. Serie: Geología Ambiental.
- IRABIEN, M.J.
1992 *Mineralogía y geoquímica de los sedimentos actuales de los ríos Nervión-Ibaizabal, Oka, Butrón y Nive. Índices de Gestión Ambiental*. Memoria de Tesis Doctoral, Universidad del País Vasco/E.H.U., 1-320, Inédita.
- IRABIEN, M.J., YUSTA, I. Y ZABALETA, A.
2001 Metales pesados en sedimentos contaminados: variabilidad espacio-temporal en la Ría de Bilbao. *Geogaceta*, 30, 203-205.
- ITSEMAP AMBIENTAL, S.A.
1990 *Estudio de impacto ambiental de la ampliación del Puerto de Bilbao en el Abra exterior*. Puerto Autónomo de Bilbao, 5 volúmenes, Bilbao, Inédito.
- 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, 1-165, Bilbao.
- KLINGEBIEL, A. Y GAYET, J.
1995 Fluvio-lagoonal sedimentary sequences in Leyre delta and Arcachon bay, and Holocene sea level variations, along the Aquitaine coast (France). *Quaternary International*, 29/30, 111-117.
- LEA, D.W.
1999 Trace elements in foraminiferal calcite. En: Sen Gupta, B.K. (Ed.), *Modern foraminifera*. Kluwer, 250-277, Dordrecht.
- LE CAMPION, J.
1968 Foraminifères des principaux biotopes du Bassin d'Arcachon et du proche océan. *Bulletin Centre Etudes Recherches Scientifiques Biarritz*, 7, 207-391.
- LE CAMPION, J.
1970 Contribution a l'étude des foraminifères du Bassin d'Arcachon et du proche Océan. *Bulletin de l'Institut de Géologie du Bassin d'Aquitaine*, 8, 3-98.
- LESUEUR, P., TASTET, J.-P. Y MARAMBAT, L.
1996 Shelf mud fields formation within historical times: examples from offshore the Gironde estuary, France. *Continental Shelf Research*, 16, 1849-1870.

- LESUEUR, P., TASTET, J.-P. Y WEBER, O.
2002 Origin and morphosedimentary evolution of fine-grained modern continental shelf deposits: the Gironde mud fields (Bay of Biscay, France). *Sedimentology*, 49, 1299-1320.
- LEORRI, E. Y CEARRETA, A.
2004 Holocene environmental development of the Bilbao estuary, northern Spain: sequence stratigraphy and foraminiferal interpretation. *Marine Micropaleontology*, 51, 75-94
- LOEBLICH, A.R. Y TAPPAN, H.
1988 *Protista 2, Sarcodina, chiefly "thecameobians" and Foraminiferida*. En: Treatise on Invertebrate Paleontology (Ed.: R.C. Moore). Academic Press, 2 Vols., 1-900, New York.
- MARY, G.
1983 Evolución del margen costero de la Cordillera Cantábrica en Asturias desde el Mioceno. *Trabajos de Geología*, 13, 3-35.
- MATERA, N.J. Y LEE, J.J.
1972 Environmental factors affecting the standing crop of foraminifera in sublittoral and psammolittoral communities of a long Island saltmarsh. *Marine Biology*, 14, 89-103.
- MOODLEY, L. Y HESS, C.
1992 Tolerance of infaunal benthic foraminifera to low and high oxygen concentrations. *Biological Bulletin*, 183, 94-98.
- MURRAY, J.W.
1963 Ecological experiments on foraminifera. *Journal of Marine Biology Association UK*, 43, 621-642.
- MURRAY, J.W.
1971a Living foraminiferids of tidal marshes: a review. *Journal of Foraminiferal Research*, 1, 153-161.
- MURRAY, J.W.
1971b *Atlas of British recent foraminiferids*. Heinemann Educational Books, 1-244, London.
- MURRAY, J.W.
1973 *Distribution and ecology of living benthic foraminifers*. Heinemann Educational Books, 1-274, London.
- MURRAY, J.W.
1979 *British Nearshore Foraminiferids*. Synopsis of the British Fauna. (New Series) 16. Academic Press. 1-68. London.
- MURRAY, J.W.
1982 Benthic foraminifera: the validity of living, dead or total assemblages for the interpretation of Palaeoecology. *Journal of Micropaleontology*, 1, 137-140.
- MURRAY, J.W.
1984 *Benthic foraminifera: some relationships between ecological observations and paleoecological interpretations*. En: Oertli, H.J. (Ed.), Benthos'83 2nd International Symposium on Benthic Foraminifera (Pau, Abril 1983), 465-469.
- MURRAY, J.W.
1991 *Ecology and Palaeoecology of Benthic Foraminifera*. Longman, 1-397, Harlow.
- MURRAY, J.W.
2000 *When does environmental variability become environmental change? The proxy record of benthic foraminifera*. En: Martin, R.E. (Ed.), Environmental Micropaleontology. The application of Microfossils to Environmental Geology, Plenum Press, 7-37, Dordrecht.
- MURRAY, J.W.
2001 The niche of benthic foraminifera, critical thresholds and proxies. *Marine Micropaleontology*, 41, 1-7.
- MURRAY, J.W.
2003 Patterns in the cumulative increase in species from foraminiferal time-series. *Marine Micropaleontology*, 48, 1-21.
- MURRAY, J.W. Y ALVE, E.
1999 Taphonomic experiments on marginal marine foraminiferal assemblages: how much ecological information is preserved? *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 149, 183-197.
- MURRAY, J.W. Y HAWKINS, A.B.
1976 Sediment transport in the Severn estuary during the post 8000-9000 years. *Journal of the Geological Society of London*, 132, 385-398.
- NRIAGU, J.O. Y PACYNA, J.M.
1988 Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace-metals. *Nature*, 333, 134-139.
- PASCUAL, A.
1981 *Los foraminíferos actuales del litoral vizcaíno*. Tesis de Licenciatura, Universidad del País Vasco/EHU, 1-101, Inédita.
- PASCUAL, A.
1984 Los foraminíferos actuales del litoral vizcaíno. *Kobie*, 14, 341-350.

- PASCUAL, A.
1990 *Utilización de los foraminíferos bentónicos y ostrácodos para un mejor conocimiento del medio ambiente en los estuarios vizcaínos: aplicación a las Rías de Guernica y de Bilbao*. Memoria de Tesis Doctoral, Universidad del País Vasco/EHU, 1-354, Inédita.
- PASCUAL, A.
1992 *Utilización de los foraminíferos bentónicos para un mejor conocimiento del medio ambiente en los estuarios vizcaínos (Gernika y Bilbao)*. *Revista Española de Micropaleontología*, 24, 33-57.
- PASCUAL, A. Y ORUE-ETXEBARRIA
1985 *Primeros datos acerca de los foraminíferos encontrados en el estuario de la Ría de Bilbao*. *Actas de la I Reunión del Cuaternario Ibérico*, 241-252.
- PASCUAL, A., RODRÍGUEZ-LÁZARO, J., WEBER, O. Y JOUANNEAU, J.-M.
2001 *Cambios paleogeográficos durante el Holoceno en las marismas de Forua, Reserva de la Biosfera de Urdaibai*. *Geocaceta*, 30, 191-194.
- PASCUAL, A., RODRÍGUEZ-LÁZARO, J., WEBER, O. Y JOUANNEAU, J.-M.
2002 *Late Holocene pollution in the Gernika estuary (southern Bay of Biscay) evidenced by the study of Foraminifera and Ostracoda*. *Hydrobiologia*, 475/476, 477-491.
- PASCUAL, A., WEBER, O., CABALLERO, F., RODRÍGUEZ-LÁZARO, J. Y JOUANNEAU, J.-M.
1999 *Análisis integral (micropaleontología y sedimentología) de un sondeo supramareal Holoceno en la ría de Gernika (Golfo de Vizcaya)*. *Geocaceta*, 26, 75-78.
- PASCUAL, A., WEBER, O., RODRÍGUEZ-LÁZARO, J., JOUANNEAU, J.-M., CABALLERO, F., ELORZA, J. Y JOUANNEAU, J.-M.
2000a *Evolución sedimentaria del polder Anbeko (Reserva de Urdaibai, Golfo de Vizcaya) durante el Holoceno*. *Geocaceta*, 28, 113-116.
- PASCUAL, A., WEBER, O., RODRÍGUEZ-LÁZARO, J. Y JOUANNEAU, J.-M.
2000b *Reconstrucción paleogeográfica de la Ría de Gernika durante el Holoceno: evidencias geológicas*. En: Gobierno Vasco y UNESCO (Eds.), *Investigación aplicada a la Reserva de la Biosfera de Urdaibai*. 209-214, Bilbao.
- PASCUAL, A., WEBER, O., RODRÍGUEZ-LÁZARO, J., JOUANNEAU, J.-M. Y PUJOS, M.
1998 *Le comblement de la ría de Gernika (golfe de Gascogne) à l'Holocène terminal*. *Oceanologica Acta*, 21, 263-269.
- PHILLIPS, D.J.H. Y SEGAR, D.A.
1986 *Use of bio-indicators in monitoring conservative contaminants: Programme desing and imperatives*. *Marine Pollution Bulletin*, 17, 10-17.
- PHLEGER, F.B.
1976 *Benthic foraminiferids as indicators of organic production in marginal marine areas*. En: *First International Symposium on Benthonic Foraminifera of Continental Margins. Part A. Ecology and Biology*, *Maritime Sediments*, Special Publication, 1, 107-117.
- PIRAZZOLI, P.A.
1991 *World Atlas of Holocene Sea-Level Changes*. Elsevier, 1- 300, Amsterdam.
- PONTEE, N.I., TASTET, J.-P. Y MASSÉ, L.
1997 *Morpho-sedimentary evidence of Holocene coastal changes near the mouth of the Gironde estuary and on Médoc peninsula, S.W. France*. Guide of the Fieldmeeting on Holocene coastal changes in the Aquitaine region, relationships with human settlements, Bordeaux, France.
- PRITCHARD, D.W.
1967 *What is an estuary: physical viewpoint*. In: Lauff, G.E. (Ed.), *Estuaries*. American Association for the Advancement of Science, 83, 3-5, Washington D.C.
- PUERTOS DEL ESTADO
1997 *Atlas Geotécnico del Puerto de Bilbao*. Centro de Publicaciones del Ministerio de Fomento, Madrid.
- PUJOS, M.
1976 *Ecologie du Foraminifères benthiques et des thecamoebiens de la Gironde et du plateau continental sud-gascogne. Application a la connaissance du Quaternarie terminal de la region ouest-gironde*. *Mémoire de l'Institut de Geologie du Bassin d'Aquitaine*, 8, 1-438.
- RIVAS, V.
1991 *Evolución reciente y estado actual del litoral cantábrico oriental*. Memoria de Tesis Doctoral, Universidad de Murcia, 1-537, Inédita.
- RUIZ DE LA ROSA, J.M. Y SÁIZ-SALINAS J.I.
1992 *Niveles de metales pesados en sedimentos e infauna asociada a la Ría de Bilbao*. *Publicaciones Especiales del Instituto Español de Oceanografía*, 11, 399-404.
- SÁIZ-SALINAS, J.I.
1997 *Evaluation of adverse biological effects induced by pollution in the Bilbao estuary (Spain)*. *Environmental Pollution*, 96, 351- 359.

- SÁIZ-SALINAS, J.I., FRANCÉS-ZUBILLAGA, G. E IMAZ-EIZAGUIRRE, X.
1996 *Uso de bioindicadores en la evaluación de la contaminación de la Ría de Bilbao*. Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco/EHU, 1-128, Bilbao.
- SÁNCHEZ-GOÑI, M.F.
1996 Vegetation and sea level changes during the Holocene in the estuary of the Bidasoa (Southern part of the Bay of Biscay). *Quaternaire*, 7, 207-219.
- SANDERS, H.L.
1960 Benthic studies in Buzzards Bay III. The structure of the soft-bottom community. *Limnology and Oceanography*, 5, 138-153.
- SENER
1998 *Proyecto básico de dragado en Bakio para la regeneración de la Playa de Arrigunaga* (T.M. de Getxo-Bizkaia). Inédito para la diputación Foral de Bizkaia.
- SCHAFFER, C.T., COLLINS, E.S. Y SMITH, J.N.
1991 Relationship of foraminifera and thecamoebian distributions to sediments contaminated by pulp mill effluent: Saguenay Fiord, Quebec, Canada. *Marine Micropaleontology*, 17, 255-283.
- SCHNITKER, D.
1969 Distribution of Foraminifera on a portion of the continental shelf of the Golfe de Gascogne (Gulf of Biscay). *Bulletin Centre Recherches de Pau SNPA*, 3, 33-64.
- SCOTT, D.B.; MEDIOLI, F.S. Y SCHAFFER, C.T.
2001 *Monitoring in coastal environments using foraminifera and thecamoebian indicators*. Cambridge University Press, 1-177, Cambridge.
- SCOTT, D.B.; SCHAFFER, C.T. Y MEDIOLI, F.S.
1980 Eastern Canadian estuarine foraminifera: a framework for comparison. *Journal of Foraminiferal Research*, 10, 205-234.
- SCOTT, D.B.; SCHAFFER, C.T.; HINING, C. Y YOUNGER, D.C.
1995 Temporal variations in benthic foraminiferal assemblages under or near aquaculture operations: documentation of impact history. *Journal of Foraminiferal Research*, 25, 224-235.
- SEEBOLD, I.; LABARTA, C. Y AMIGÓ, J.M.
1982 *Heavy metals in the sediments of the Bilbao estuary*. En: Albaiges, J. (Ed.), *Analytical techniques in Environmental Chemistry*, Pergamon Press, 459-463, Oxford.
- SEN GUPTA, B.K. Y MACHAIN-CASTILLO, M.L.
1993 Benthic foraminifera in oxygen-poor habitats. *Marine Micropaleontology*, 20, 183-201.
- SHARIFI, A.R., CROUDACE, I.W. Y AUSTIN, R.L.
1991 Benthic foraminiferids as pollution indicators in Southampton Water, southern England, U.K. *Journal of Micropalaeontology*, 10, 109-113.
- STUIVER, M. Y BRAZUINAS, T.F.
1993 Modeling atmospheric 14C influences and 14C ages of marine samples back to 10,000 BC. *Radiocarbon*, 35, 137-189.
- STUIVER, M.; REIMER, P.J.; BARD, E.; BECK, J.W.; BURR, G.S.; HUGHEN, K.A.; KROMER, B.; MCCORMAC, F.G.; VAN DE PLICHT, J. Y SPURK, M.
1998 INTCAL98 Radiocarbon age calibration 24,000-0 cal BP. *Radiocarbon*, 40, 1041-1083.
- TASTET, J.-P. Y PONTEE, N.I.
1998 Morpho-chronology of coastal dunes in Médoc. A new interpretation of Holocene dunes in Southwestern France. *Geomorphology*, 25, 93-109.
- THOMAS, E. Y VAREKAMP J.C.
1991 Paleo-environmental analyses of marsh sequences (Clinton, Connecticut): evidence for punctuated rise in relative sea-level during the latest Holocene. *Journal of Coastal Research Special Issue*, 11, 125-158.
- VAIL, P.R.; AUDEMARD, F.; BOWMAN, S.A.; EISNER, P.N. Y PEREZ-CRUZ, C.
1991 *The stratigraphic signatures of tectonics, eustasy, and sedimentology-an overview*. En: Einsele, G., Ricken, W. y Seilacher, A. (Eds.), *Cycles and Events in Stratigraphy*. Springer-Verlag, 617-659, Berlin.
- VALETTE-SILVER, N.J.
1993 The use of sediment cores to reconstruct historical trends in contamination of estuarine and coastal sediments. *Estuaries*, 16, 577-588.
- VAN DER ZWAAN, G.J.; DUIJNSTEE, I.A.P.; DULK, M. DEN; ERNST, S.R.; JANNINK, N.T. Y KOUWENHOVEN, T.J.
1999 Benthic foraminifers: proxies or problems? A review of paleoecological concepts. *Earth-Science Reviews*, 46, 213-236.
- VAREKAMP, J.C.
1991 Trace element geochemistry and pollution history of mudflat and marsh sediments from the Connecticut coastline. *Journal of Coastal Research Special Issue*, 11, 105-123.

WALTON, W.R.

- 1952 Techniques for recognition of living foraminifera. *Contributions from the Cushman Foundation for Foraminiferal Research*, 3, 56-60.

WEISS, D.

- 1976 Distribution of benthic foraminifera in the Hudson river estuary. En: First International Symposium on Benthonic Foraminifera of Continental Margins. Part A. Ecology and Biology, *Maritime Sediments*, Special Publication, 1, 119-129.

WILBER, W.G. Y HUNTER J.V.

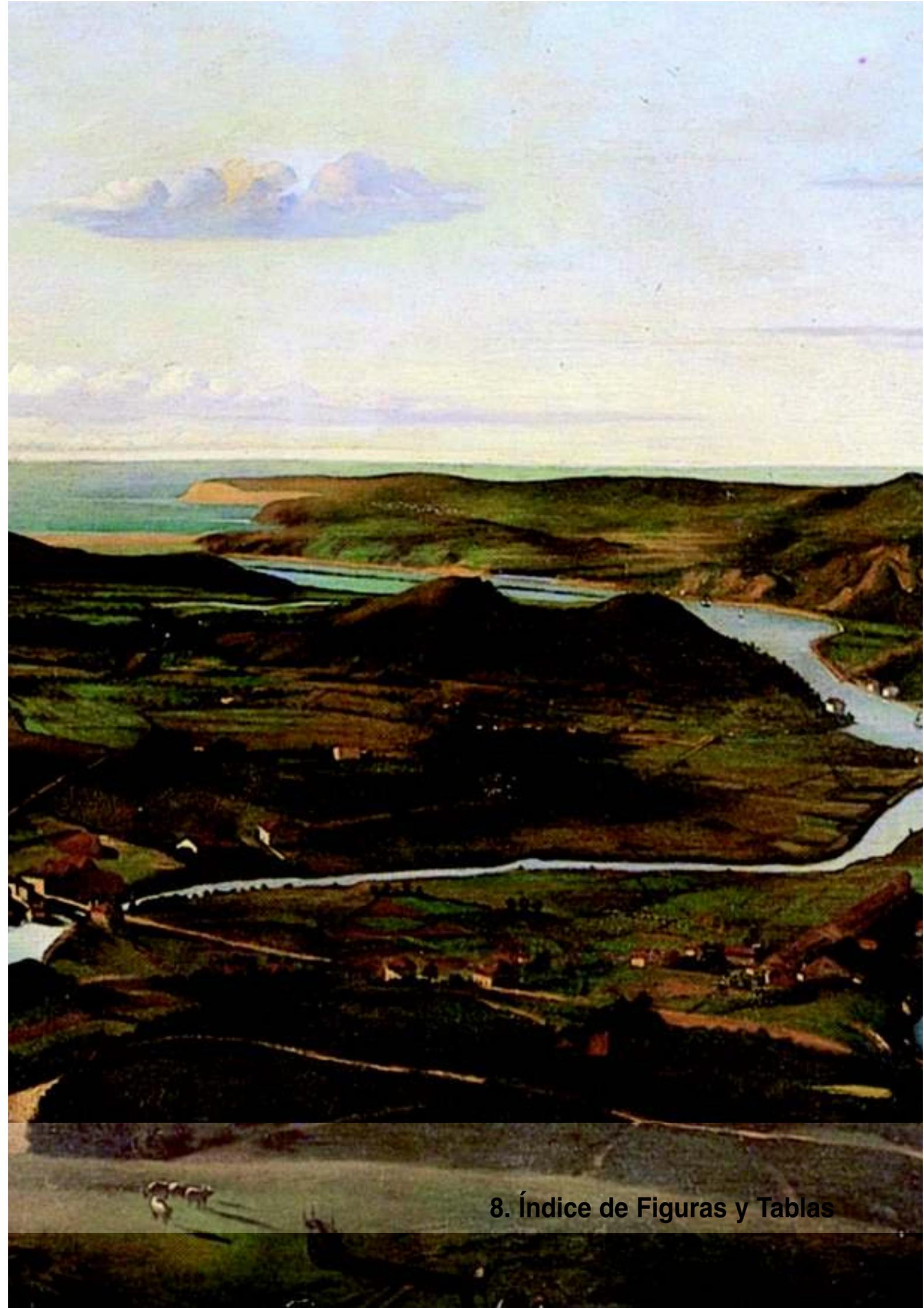
- 1979 The impact of urbanization on distribution of heavy metals in bottom sediments of the Saddle River. *Water Resources Bulletin*, 15, 790-800.

YANKO, V., KRONFELD, J. Y FLEXER, A.

- 1994 Response of benthic foraminifera to various pollution sources: implications for pollution monitoring. *Journal of Foraminiferal Research*, 24, 1-17.

ZHANG, J.

- 1995 Geochemistry of trace metals from Chinese river/estuary systems: an overview. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 41, 631-658.



FIGURAS

Figura 1-1: Foraminíferos teñidos con Rosa de Bengala en las muestras actuales de la Ría de Bilbao	20
Figura 1-2: Gráfico que permite un cálculo rápido del índice de diversidad α enfrentando el número de especies encontrado en la escala vertical y el número de caparazones extraídos en la escala horizontal (Murray, 1973)	22
Figura 1-3: Localización geográfica del área de estudio	26
Figura 1-4: Mapa geológico de la cuenca fluvial del Nervión-Ibaizabal	28
Figura 1-5: Mapa de localización geográfica del área de estudio dentro del Golfo de Bizkaia	29
Figura 1-6: Ubicación geográfica de las localidades mencionadas en el texto y división por zonas de la Ría de Bilbao	31
Figura 1-7: Vista de la curva que traza el cauce fluvial en La Peña antes de convertirse en ría	32
Figura 1-8: Vista aérea del trazado de la ría desde Bilbao hasta la desembocadura.....	32
Figura 1-9: Cuadro del año 1740 de la desembocadura de la ría	33
Figura 1-10: Reconstrucción pictórica que representa la ría hacia el año 1300 y donde se puede apreciar Bilbao antes de su fundación como Villa	34
Figura 1-11: Mapa del s. XVII del tramo superior de la ría.....	35
Figura 1-12: Plano general de la Ría de Bilbao en el año 1877.....	36
Figura 1-13: Evaristo Churruga, Ingeniero Jefe de la Junta de Obras del Puerto	37
Figura 1-14: Prolongación del muelle de Portugalete en la margen izquierda con una ligera curvatura (año 1891)	38
Figura 1-15: Plano del proyecto de Evaristo Churruga (finales del s. XIX)	38
Figura 1-16: La ría en la zona de Axpe a finales del s. XIX	39
Figura 1-17: Obras de rectificación del cauce en La Salve en 1885.....	40
Figura 1-18: Plano de las obras ejecutadas en la desembocadura de la ría en el año 1905.....	40
Figura 1-19: Obras del Canal de Deusto en 1960	41
Figura 1-20: Fotomontaje del proyecto actual de ampliación del Puerto Exterior	42
Figura 1-21: Actividad minera en la primera mitad del s. XIX en La Arboleda	43
Figura 1-22: Altos Hornos de Vizcaya S.A., después de unirse las tres grandes factorías siderúrgicas en 1902	44
Figura 1-23: Los Astilleros de Sestao en 1980	45
Figura 1-24: Beach-rock (playa cementada) de Arrigunaga	46
Figura 1-25: “Baños de mar” en la pequeña playa de Portugalete (año 1892).....	47
Figura 1-26: Vertidos directos a la ría sin ningún tipo de tratamiento en los años 70 (siglo XX)	48
Figura 1-27: Foto aérea (año 1957) donde se observa el giro en sentido horario de la corriente estuarina vaciante dentro del Abra.....	49
Figura 2-1: Perfil típico de la costa Cantábrica: desde la Bahía de Plentzia-Gorliz hasta el Abra (al fondo).....	53
Figura 2-2: Localización geográfica de la Ría de Bilbao, posición de los sondeos profundos y extensión original de los dominios estuarinos holocenos.....	54
Figura 2-3: La industria situada en la margen izquierda (Barakaldo) a principios del s. XX.....	55
Figura 2-4: Secuencia sedimentaria, información micropaleontológica general, distribución y abundancia de las principales especies respecto a la profundidad (m) en el sondeo SR12 (estuario medio) de la Ría de Bilbao.....	58
Figura 2-5: Secuencia sedimentaria, información micropaleontológica general, distribución y abundancia de las principales especies respecto a la profundidad (m) en el sondeo SR6 (estuario medio) de la Ría de Bilbao.....	59
Figura 2-6: Secuencia sedimentaria, información micropaleontológica general, distribución y abundancia de las principales especies respecto a la profundidad (m) en el sondeo SM13 (estuario inferior) de la Ría de Bilbao.....	60

Figura 2-7: Secuencia sedimentaria, información micropaleontológica general, distribución y abundancia de las principales especies respecto a la profundidad (m) en el sondeo SM11 (estuario inferior) de la Ría de Bilbao	61
Figura 2-8: Secuencia sedimentaria, información micropaleontológica general, distribución y abundancia de las principales especies respecto a la profundidad (m) en el sondeo SM1 (estuario inferior) de la Ría de Bilbao	62
Figura 2-9: Secuencia sedimentaria, información micropaleontológica general, distribución y abundancia de las principales especies respecto a la profundidad (m) en el sondeo S19 (estuario inferior) de la Ría de Bilbao.....	63
Figura 2-10: Secuencia sedimentaria, información micropaleontológica general, distribución y abundancia de las principales especies respecto a la profundidad (m) en el sondeo S13 (estuario inferior) de la Ría de Bilbao	64
Figura 2-11: Secuencia sedimentaria, información micropaleontológica general, distribución y abundancia de las principales especies respecto a la profundidad (m) en el sondeo S5 (frente marino) de la Ría de Bilbao	65
Figura 2-12: Secuencia sedimentaria, información micropaleontológica general, distribución y abundancia de las principales especies respecto a la profundidad (m) en el sondeo LAS1 (frente marino) de la Ría de Bilbao	66
Figura 2-13: Resultados del índice de diversidad específica α agrupados por zonas. A Abra; B Estuario inferior, margen derecha; C Estuario inferior, margen izquierda; D Estuario medio	67
Figura 2-14: Interpretación paleoambiental de los sondeos de la Ría de Bilbao basada en las asociaciones de foraminíferos. A Estuario medio y superior; B Estuario inferior y Abra	70-71
Figura 2-15: Interpretación de la secuencia estratigráfica de los depósitos holocenos de la Ría de Bilbao. El cuadro representa la profundidad del fondo estuarino a través del tiempo	73
Figura 2-16: Mapa del meandro abandonado (Hazera, 1968).....	76
Figura 2-17: Localización geográfica del meandro de Barakaldo, posición de los sondeos profundos y muestras superficiales.....	77
Figura 2-18: Secuencia sedimentaria, información micropaleontológica general, distribución y abundancia de las principales especies respecto a la profundidad (m) en los sondeos ANS1 y ANS2 (meandro abandonado de Barakaldo) de la Ría de Bilbao.....	79
Figura 2-19: Resultados del índice de diversidad específica α de los dos sondeos estudiados (ANS1 y ANS2).....	80
Figura 2-20: Interpretación paleoambiental de los sondeos del meandro abandonado de Barakaldo, basada en las asociaciones de foraminíferos	81
Figura 3-1: Zonas superior, media de la ría e inferior de la ría.....	97
Figura 3-2: Localización geográfica de la Ría de Bilbao, mostrando la situación de los sondeos de percusión realizados.....	98
Figura 3-3: Perforación del sondeo Zorroza (PCZ) en la Ría de Bilbao	99
Figura 3-4: Contenido en arena (%), Ca (%), abundancia absoluta de caparazones y especies de foraminíferos, zonas basadas en la abundancia de foraminíferos y concentraciones de elementos con la profundidad (m) en el sondeo de percusión Zorroza (Ría de Bilbao)	100
Figura 3-5: Detalle del testigo obtenido en la perforación realizada en Asua (PCA).....	101
Figura 3-6: Contenido en arena (%), Ca (%), abundancia absoluta de caparazones y especies de foraminíferos, zonas basadas en la abundancia de foraminíferos y concentraciones de elementos con la profundidad (m) en el sondeo de percusión Asua (Ría de Bilbao)	102
Figura 3-7: Detalle de la perforación en el área de Erandio (PCE)	103
Figura 3-8: Contenido en arena (%), Ca (%), abundancia absoluta de caparazones y especies de foraminíferos, zonas basadas en la abundancia de foraminíferos y concentraciones de elementos con la profundidad (m) en el sondeo de percusión Erandio (Ría de Bilbao)	104
Figura 3-9: Vista general de la zona de muestreo en Galindo	105
Figura 3-10: Contenido en arena (%), Ca (%), abundancia absoluta de caparazones y especies de foraminíferos, zonas basadas en la abundancia de foraminíferos y concentraciones de elementos con la profundidad (m) en el sondeo de percusión Galindo (Ría de Bilbao).....	106

Figura 3-11: Detalle de la perforación en la zona de Simondrogas (PCS), con Erandio al fondo.....	107
Figura 3-12: Contenido en arena (%), Ca (%), abundancia absoluta de caparazones y especies de foraminíferos, zonas basadas en la abundancia de foraminíferos y concentraciones de elementos con la profundidad (m) en el sondeo de percusión Simondrogas (Ría de Bilbao).....	108
Figura 3-13: Detalle de la perforación en la zona de desembocadura del Gobelás.....	109
Figura 3-14: Contenido en arena (%), Ca (%), abundancia absoluta de caparazones y especies de foraminíferos, zonas basadas en la abundancia de foraminíferos y concentraciones de elementos con la profundidad (m) en el sondeo de percusión Gobelás (Ría de Bilbao)	110
Figura 3-15: Interpretación ambiental de los sondeos de percusión de la Ría de Bilbao basada en la combinación de los resultados microfaunísticos y geoquímicos	112
Figura 4-1: Localización geográfica de la Ría de Bilbao, mostrando la posición de las muestras superficiales y los pequeños testigos.....	122
Figura 4-2: Muestreo superficial en La Ribera (zona superior del estuario).....	124
Figura 4-3: Abundancia de foraminíferos vivos y muertos en las muestras de sedimento superficial a lo largo de la Ría de Bilbao.....	125
Figura 4-4: Zona de muestreo superficial de la Benedicta en Sestao, la muestra más próxima a la desembocadura obtenida dentro del estuario.....	126
Figura 4-5: Zona de muestreo superficial de Arriluze en Getxo, en la bahía de El Abra, fuera del estuario	126
Figura 4-6: Concentraciones de elementos químicos en las muestras superficiales de la Ría de Bilbao	129
Figura 4-7: Sección longitudinal del testigo obtenido en Zorroza	130
Figura 4-8: Imagen de rayos -X, contenido en arena, y actividad de Cs-137, Pb-210 y K-40 con la profundidad (cm) en el testigo Zorroza	131
Figura 4-9: Concentraciones de elementos químicos con la profundidad (cm) ,en el testigo Zorroza (Ría de Bilbao)	132
Figura 4-10: Los dos pequeños tubos de PVC introducidos en el fango del punto de muestreo en Erandio y una sección longitudinal del testigo obtenido	133
Figura 4-11: Imagen de rayos -X, contenido en arena , y actividad de Cs-137, Pb-210 y K-40 con la profundidad (cm) en el testigo de Erandio	134
Figura 4-12: Concentraciones de elementos químicos con la profundidad (cm) en el testigo de Erandio (Ría de Bilbao)	135
Figura 4-13: Fotografías con microscopio electrónico de barrido de sedimentos procedentes del testigo de Erandio	136
Figura 4-14: Los dos pequeños tubos de PVC introducidos en el fango del punto de muestreo en Udondo y una sección longitudinal del testigo obtenido	137
Figura 4-15: Imagen de rayos -X, contenido en arena, y actividad de Cs-137, Pb-210 y K-40 con la profundidad (cm) en el testigo de Udondo.....	138
Figura 4-16: Concentraciones de elementos químicos con la profundidad (cm) en el testigo de Udondo (Ría de Bilbao).....	139
Figura 4-17: Abundancia absoluta de caparazones y especies de foraminíferos en los testigos de Zorroza, Erandio y Udondo (Ría de Bilbao)	141
Figura 5-1: Localización geográfica de la Ría de Bilbao, mostrando la posición de las muestras superficiales	150
Figura 5-2: Secuencia de fotografías obtenidas durante el dragado realizado en Noviembre 2000 en el punto de muestreo 1(zona superior).....	151
Figura 5-3: Detalle de la recogida del material superficial utilizado para el análisis micropaleontológico, en la zona de Rontegi (muestra 7-Mayo 2000)	152
Figura 5-4: Abundancia de foraminíferos vivos y muertos en las muestras de sedimento superficial a lo largo de la Ría de Bilbao.....	153

Figura 5-5: Muestreo de materiales superficiales para los análisis micropaleontológico y geoquímico en la zona de Atxuri (muestra 1, zona superior)	154
Figura 5-6: Muestreo superficial en la zona de Rontegi (zona media)	155
Figura 5-7: Zona de muestreo superficial de Lamiako (muestra 12, zona inferior)	156
Figura 5-8: Abundancia de foraminíferos vivos y muertos en las muestras de sedimento superficial correspondientes a los muestreos de Junio 1997 y Octubre 1997 en Lamiako (muestra 12), zona inferior del estuario	157
Figura 5-9: Comparación de los factores de enriquecimiento de los diferentes elementos químicos analizados en las muestras superficiales de la Ría de Bilbao. Se comparan los resultados obtenidos en el periodo 1997-2003 para las diferentes zonas en que se ha dividido el estuario	159

TABLAS

Tabla 1-1: Categorías de abundancias en función del número de caparazones, del porcentaje de foraminíferos exóticos y del número de especies	21
Tabla 2-1: Dataciones de radiocarbono	83
Tabla 2-2: Resumen de los resultados microfauísticos	84-85
Tabla 2-3: Resumen de los resultados sedimentológicos	86-87
Tabla 2-4: Resumen de los resultados microfauísticos y sedimentológicos de los sondeos del meandro abandonado de Barakaldo	88
Tabla 3-1: Abundancia de diferentes elementos químicos en los sondeos de percusión de la Ría de Bilbao	114
Tabla 3-2: Resumen de los resultados microfauísticos	115
Tabla 4-1: Composición elemental de la Ría de Bilbao obtenida de las muestras superficiales, pequeños testigos y sondeos holocenos	143
Tabla 5-1: Composición elemental de la Ría de Bilbao obtenida de los sondeos holocenos y las muestra superficiales en Octubre 1997, Enero 2000 y Febrero 2003	163



Alejandro Cearreta Euskal Herriko Unibertsitateko (UPV/EHU) Estratigrafia eta Paleontologia Saileko irakasle titularra da. Geologian lizentziaduna EHUn, Exeterreko Unibertsitatean (Erresuma Batua) egin zuen doktore tesia. Kostaldeko ingurumenaren transformazioari eta itsas inguruko aldaketei buruzko ikerlan ugari egin ditu, batez ere Bizkaiko Golkoaren ezker ibarrean gertatutakoei buruzkoak. Ikerketa-proiektu eta argitalpen askotan parte hartu du, bai Espainiako, bai atzerriko zenbait ikastegitan.

Alejandro Cearreta es Profesor Titular en el departamento de Estratigrafía y Paleontología de la Universidad del País Vasco/EHU. Licenciado en Ciencias Geológicas por la UPV/EHU, realizó su tesis doctoral en la Universidad de Exeter (UK). Su dilatada carrera investigadora ha estado centrada en la transformación ambiental de la zona costera y los cambios en el nivel marino, especialmente en el margen sur del Golfo de Bizkaia. Ha participado en numerosos proyectos de investigación y publicaciones con investigadores de centros nacionales y extranjeros.

Azken 8.500 urteotan gutxienez, Bilboko Itsasadarrean marearte ugari izan dira, eta marearte horietan foraminifero bentoniko asko bizi izan dira. Dena dela, XIX. mendearen erdialdeaz geroztik, aldaketa ikaragarria gertatu da, bai sedimentuen ezaugarri kimikoei dagokienez, bai bertako mikrofauna bereizgarriari dagokionez, eta hori itsasadarreko estuario-eremuak beteta daudelako (horrek jatorrizko estuarioa marearteko ubide huts bihurtu du), eta mehatzeetako, industrietako zein etxeetako hondakinak izugarri ugaltu direlako gertatu da.

Gaur egun, Bilboko Itsasadarreko gainazaleko sedimentuetara eramandako zenbait foraminifero bizirik daude; espezie horiek, halaber, nagusi dira hurbileko beste estuario batzuetan, bai eta Bilboko jatorrizko estuarioan bertan ere. Horrek guztiak argi erakusten digu posible dela fauna zeharo galduta zegoen gunek arrakastaz birpopulatzea, baldin eta ingurumen-baldintzak aski hobetzen badira. Hala, bada, tokian tokiko erakundeek sustatutako birpopulatze-programaren egokitasuna zer-nolako den zehazteko ezin baliabide egokiagoa da mikrofauna.

Al menos durante los últimos 8.500 años la Ría de Bilbao ha estado caracterizada por el desarrollo de una gran variedad de ambientes 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 mineros, industriales y domésticos han provocado un cambio dramático en las características químicas de los sedimentos y la total eliminación de su microfauna característica.

Hoy en día, la presencia en los sedimentos superficiales de la Ría de Bilbao de algunos foraminíferos vivos transportados, cuyas especies han sido identificadas como dominantes en otros medios estuarinos próximos y en el propio estuario original de Bilbao, sugiere 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 muy útil para determinar la efectividad del programa de regeneración impulsado por las instituciones locales.



ARANZADI

zientzia elkarte . sociedad de ciencias
society of sciences . société de sciences

BABESLEA / PATROCINADOR

EUSKO JAURLARITZA



GOBIERNO VASCO

HEZKUNTZA, UNIBERTSITATE
ETA IKERKETA SAILA
Unibertsitate eta Ikerketa Sailburuordetza

DEPARTAMENTO DE EDUCACIÓN,
UNIVERSIDADES E INVESTIGACIÓN
Viceconsejería de Universidades e Investigación

ELKARTE LAGUNTZAILEAK / ENTIDADES COLABORADORAS

