

Historia ambiental de la Ría de Bilbao y su registro sedimentario

GUÍA DE CAMPO

X SIMPOSIO SOBRE EL MARGEN IBÉRICO ATLÁNTICO/
X SIMPÓSIO SOBRE A MARGEM IBÉRICA ATLÂNTICA

Bilbao, 9 Julio 2022



Historia ambiental de la Ría de Bilbao y su registro sedimentario

Coordinador: Alejandro Cearreta (UPV/EHU)

ÍNDICE

Introducción	3
1. Artxanda. Historia de la transformación ambiental de la Ría de Bilbao	4
2. Enekuri. Relleno sedimentario holoceno: ascenso del nivel marino	9
3. Las Arenas. Registro sedimentario reciente: desarrollo industrial del estuario	12
4. El Abra interior. Eventos climáticos extremos e impactos antropogénicos	17
5. Tunelboca. Las playas cementadas de la revolución industrial	22
Referencias	25

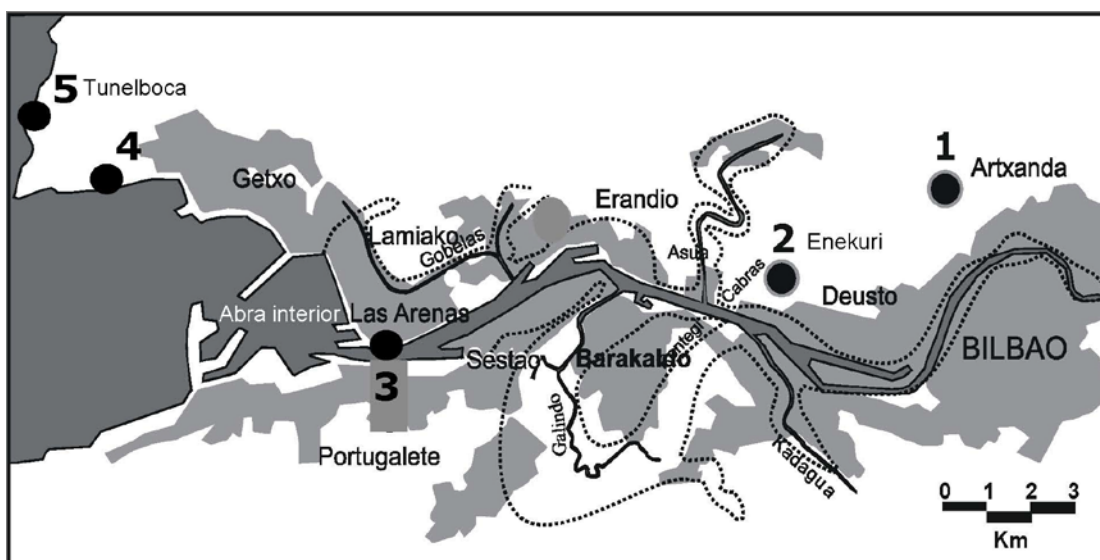
Introducción

El País Vasco presenta una larga tradición de estudios litorales y marinos. El primer trabajo sobre la costa vasca fue publicado por el geólogo francés M.E. Jacquot (1864), quien analizó con detalle los 15 km de acantilados que se extienden entre San Juan de Luz y Biarritz. Posteriormente, el buque británico *HMS Porcupine* realizó en 1869 la primera campaña oceanográfica que incluyó el estudio científico del Golfo de Bizkaia. La Sociedad de Oceanografía de Guipúzcoa (SOG) se fundó en 1908 y las primeras campañas de investigación que se ocuparon de los fondos marinos de la costa vasca fueron llevadas a cabo por los buques *Hernán Cortés* en 1924 y *Xauen* en 1932 y 1933, gracias a un convenio de colaboración entre la SOG y el Instituto Español de Oceanografía (IEO). En el año 1946, la junta directiva de la SOG propuso al biólogo José María Navaz para que se hiciera cargo del Laboratorio de la Sociedad en el Aquarium de Donostia-San Sebastián, indicando además que su ayudante fuera Joaquín Gómez de Llarena, que contaba con una gran experiencia como geólogo especializado en sedimentos marinos. Más recientemente, el establecimiento de los estudios científicos a partir de 1971 en la Universidad de Bilbao (posteriormente Universidad del País Vasco UPV/EHU), las actividades de la Sociedad Cultural de Investigación Marina (INSUB) desde 1976, la creación del Servicio de Investigación Oceanográfica en 1982 (posteriormente denominado Instituto Tecnológico, Pesquero y Alimentario AZTI), junto con la celebración en Donostia-San Sebastián del 2º Coloquio Internacional sobre Oceanografía del Golfo de Bizkaia en 1990, han ido consolidando el desarrollo científico de esta temática.

Entre los días 7-9 de julio 2022 se ha celebrado en Bilbao el X Simposio sobre el Margen Ibérico Atlántico/ X Simpósio sobre a Margem Ibérica

Atlántica. Este congreso ha sido organizado localmente por el grupo de investigación Harea-Geología Litoral de la UPV/EHU (www.ehu.eus/harea-geologicalitoral) y, entre sus distintas actividades, ha incluido una salida de campo denominada "Historia ambiental de la Ría de Bilbao y su registro sedimentario". Esta excursión tuvo lugar el sábado 9 de julio, y a través de 5 paradas a lo largo del estuario analizó sus registros sedimentarios holoceno y antropoceno.

En la historia ambiental de este estuario se han identificado diferentes etapas que incluyen las condiciones pre-industriales con asociaciones abundantes de microfósiles y niveles naturales de metales desde hace 8.500 años, una etapa industrial antigua (1850-1950) con elevados contenidos en metales y asociaciones abundantes de microfósiles, la desaparición de microfósiles durante la etapa industrial moderna (1950-2009) como resultado de los mínimos niveles de oxígeno y la máxima cantidad de vertidos industriales, y finalmente la disminución en la concentración de metales y el incremento en la abundancia de organismos, consecuencia de la mejora post-industrial reciente. Esta salida fue coordinada por Alejandro Cearreta.



Localización de las paradas durante la salida de campo por la Ría de Bilbao.

Parada 1 Artxanda. Historia de la transformación ambiental de la Ría de Bilbao

Introducción

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 que le permitiera explotar las posibilidades portuarias de la ría. La naturaleza proporcionó a Bilbao dos 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 de Bilbao y su valle han proporcionado el soporte físico sobre el que se ha ido construyendo a lo largo de la historia la aglomeración urbana e industrial. La ría que hoy conocemos es una creación completamente artificial. Se encuentra prisionera entre diques que encauzan y modifican todo su recorrido para adaptarlo a las exigencias de la navegación, y además todos sus dominios le fueron arrebatados para asentar el tejido industrial y urbano del siglo XX.

La enorme alteración física de todo este espacio ha sido consecuencia del proceso de transformación económica de Bilbao desde una villa pre-industrial de pequeñas dimensiones situada en la cabecera del estuario hasta una ciudad industrial de grandes dimensiones proyectada en torno a la ría. Así, el comercio tradicional de la lana de Castilla aseguró la vitalidad económica de Bilbao hasta el siglo XIX. A partir de ahí, la ciudad encontró una nueva orientación económica basada en la minería del

hierro y su industria siderúrgica asociada, que han caracterizado su transformación de los siglos XIX y XX (Fig. 1.1).

La Villa mercantil

La villa de Bilbao original se situó sobre un pequeño meandro en la cabecera de la ría, fácilmente defendible y accesible a la navegación por el movimiento de las mareas. El 22 de junio de 1511, los reyes de Castilla aprobaron la creación del Consulado de Bilbao, institución que materializó durante más de 300 años el control de Bilbao sobre el estuario.

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.

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 liberarse de las frecuentes y trágicas inundaciones que padecía, el año 1654 el Consulado abrió un nuevo cauce en el Campo de Volantín formando, como consecuencia, una pequeña isla que se llamó Uribitarte y que desapareció al cerrarse el cauce original en 1870.



Fig. 1.1. Vista aérea de la Ría de Bilbao y el desarrollo urbano e industrial del Bilbao Metropolitano.

El fin de la Segunda Guerra Carlista en 1876 representa un acontecimiento de primer orden en la evolución del conjunto del estuario. En ese momento se abre el proceso de desarrollo industrial que transformó Bilbao, y con él 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. El resultado de todo este proceso es la impresionante expansión urbana del conjunto de la ría que pasa de 60.000 a un millón de habitantes, convirtiendo el Bilbao histórico en el denominado "Gran Bilbao" y posteriormente el "Bilbao Metropolitano" (García-Merino, 1987).

La actividad minera

Hasta los años 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

eran de una extraordinaria riqueza, podían explotarse a cielo abierto y además se hallaban relativamente próximos al estuario. 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 (Cearreta, 1998a).

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. Asimismo, a trabajar en las minas vinieron los primeros emigrantes que luego pasarían a la industria siderúrgica. Gracias a ellas se construyeron los primeros ferrocarriles y el puerto exterior, cuyas obras se financiaron gracias a 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 las mismas personas

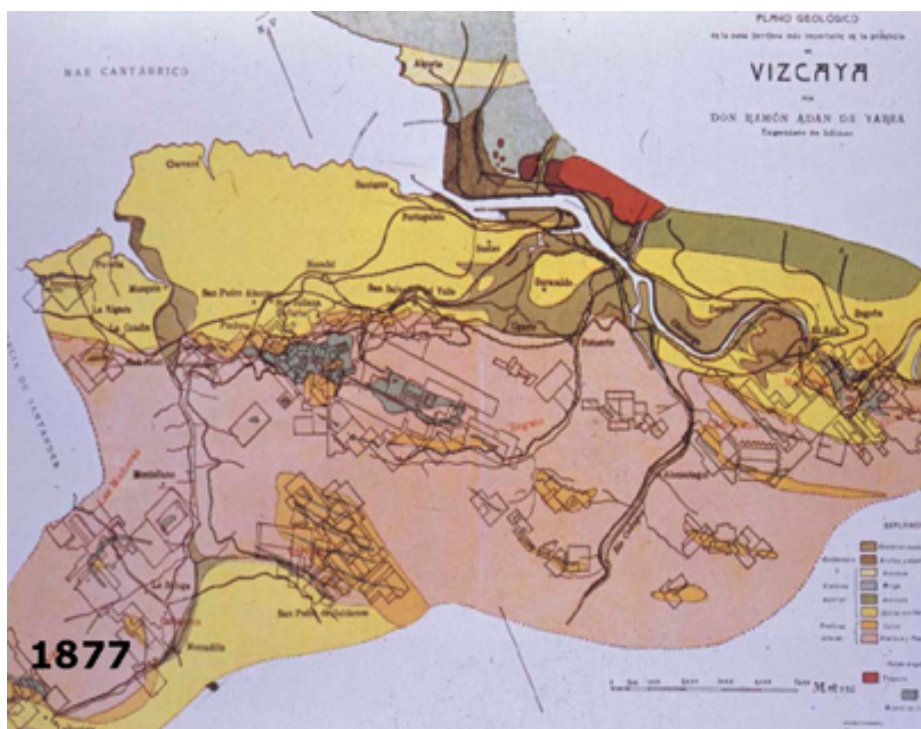


Fig. 1.2. Mapa geológico de la Ría de Bilbao y la Margen Izquierda incluyendo las concesiones mineras elaborado por Ramón Adan de Yarza en 1877.

criadero de mineral, que ya fuera descrito por el historiador romano Plinio el Viejo en el siglo I, se encontraba en Somorrostro donde se instalaron importantes núcleos mineros como Gallarta, La Arboleda o Triano (Fig. 1.2) donde actualmente persisten vestigios heredados de las explotaciones de hierro.

Las condiciones naturales de este entorno ofrecieron grandes facilidades: sus minerales

vinculadas a la (alta) burguesía vasca que se interesaron inicialmente por el negocio del hierro, como los Ybarra o los Chávarri.

Con el cambio de siglo se llegó a la conclusión de que en lugar de vender el mineral en bruto era 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

El despegue de la gran industria siderúrgica se realiza a orillas del estuario. En 1854 se funda en Desierto sobre terrenos marismenos la fábrica "Nuestra Señora del Carmen" de Barakaldo, propiedad de la familia Ybarra que contaba con un Alto Horno y un fondeadero en la Ría para su flotilla de buques. En 1882 se instala sobre los terrenos fangosos de Sestao otra fábrica de altos hornos denominada "La Vizcaya" propiedad de Víctor Chávarri. Asimismo, en Sestao se establece la tercera gran factoría siderúrgica, la fábrica "San Francisco" propiedad de José María Martínez de las Rivas. En 1902 las 3 instalaciones se fusionan y pasan a formar parte de la Sociedad Anónima "Altos Hornos de Vizcaya".

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 pasa a estar dominada por 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 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.

Desde entonces aparecen 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, y de jabón entre otras.

A partir del último cuarto del siglo XIX el paisaje tradicional de Bilbao será sustituido por un paisaje nuevo de humos y fábricas, de ferrocarriles, de urbanización opresiva, de movimiento incesante impuesto por la industria. Nada va a dejar de ser transformado, adaptado, desbordado por el Bilbao industrial que va a pasar 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 arboledas y los arroyos fueron sustituidos por edificios, vías férreas y desmontes para facilitar las comunicaciones.

Los vertidos industriales, el lavado del mineral y los efluentes urbanos contaminaron los arroyos y los acuíferos superficiales inutilizando las fuentes y convirtiendo los cursos de agua en cloacas que iban a parar a la ría. El resultado ha sido que el agua y los sedimentos del estuario tuvieron 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 (Cearreta, 1998a).

La expansión por la Ría

Hasta la primera mitad del siglo XIX fue Bilbao quien acogió el lento crecimiento demográfico de la zona. Sin embargo, 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.

En 1857 Máximo Aguirre compró al Estado los arenales y fangales de Lamiako y Las Arenas que 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 (García-Merino, 1987).

La actividad portuaria

Originalmente, a partir de La Peña (uno de los barrios situados en la cabecera del estuario) hasta donde llegaban las mareas y hacia su desembocadura, las orillas de la ría eran extensos arenales y marismas. Antes de la intervención humana, el estuario había ya abandonado algunos de sus dominios como el antiguo meandro de Barakaldo por donde ahora discurren los ríos Castaños y Galindo. Hasta el siglo XVI el mar entraba en la ría sin ningún freno de diques y escolleras, y ésta no tenía orillas determinadas. Su cauce era cambiante y estaba sembrado de bajíos de roca que hacían muy peligrosa la navegación.

El Consulado de Bilbao se encargó de encauzar con diques algunos tramos, centrando sus esfuerzos particularmente en la desembocadura donde se acumulaban grandes cantidades de arena. Donde hoy se encuentra la plaza del Puente Colgante, el Consulado mantuvo desde el siglo XVI una "Casa de Socorro y Salvamento", donde se localizaba el "Piloto

Mayor de la Barra" encargado de vigilar el estado diario de la Barra de Portugaleta y de balizar la ruta navegable más segura (Fig. 1.3).

Sin embargo, la verdadera "construcción" de la ría actual comienza a finales de 1877 con la incorporación de Evaristo de Churrua y su Junta de Obras del Puerto. La exportación del mineral y las actividades industriales estaban generando un gran movimiento en el puerto de Bilbao, pero el estuario no permitía este tráfico creciente. La historia del puerto de Bilbao a partir de este punto puede dividirse en tres etapas que consistieron inicialmente en el acondicionamiento de la ría o puerto interior entre 1878 y 1887, la posterior construcción del puerto exterior entre 1888 y 1902, y finalmente la expansión del superpuerto en el Abra desde 1968 (García-Merino, 1987).

Al proceso de sedimentación fangosa dentro de la ría se unía el depósito de arenas de origen marino en la margen derecha de la desembocadura. Estas arenas eran puestas en circulación por el oleaje y arrastradas dentro del estuario por las corrientes de marea que tendían a cerrar su desembocadura. Así se formaron los grandes arenales de Getxo con sus playas y dunas, y la famosa y temible Barra de Portugaleta (Fig. 1.3).

El encauzamiento se completó con un pequeño espigón en la orilla de Las Arenas, y fue un gran éxito permitiendo la entrada a barcos de mayor calado en 1887 cuando finalizó la obra (Hazera, 1968).

Los dragados hicieron de la Ría un canal nuevo fácilmente navegable hasta Bilbao con profundidades suficientes en todo su recorrido, para lo cual se extrajeron millones de toneladas de sedimento del fondo, permitiendo la entrada de un mayor volumen de agua. Así se eliminaron los bancos de cantos rodados y arena que existían entre Olabeaga y La Salve, conocidos como "los churros". Estos bancos emergían por encima del agua en bajamar aislando el tramo superior del estuario y obligando a descargar ahí los barcos y a transportar las mercancías en gabarras arrastradas a la sirga hasta los muelles de Bilbao.

La segunda etapa se centra en la construcción del puerto exterior, ganando al mar una buena parte del Abra a la salida de la ría. La bahía del Abra representaba un emplazamiento amplio y con mayores profundidades, pero estaba expuesta a los temporales más fuertes del NW. Su utilización como zona portuaria exigía la construcción de largos diques de defensa. Entre



Fig. 1.3. Imagen pictórica de la desembocadura de la ría en el Abra donde se muestran la Barra de Portugaleta y la playa y dunas de Las Arenas en 1740.

La eliminación de la Barra se llevó a cabo con la construcción en Portugaleta de un muelle a fin de encauzar la salida del agua de la ría, permitiendo la excavación natural de un cauce profundo y fijo. El muelle era curvo para proteger la entrada del oleaje del NW y para alejar los barcos de la costa rocosa de Santurtzi.

1889 y 1894 se construyó el dique rompeolas perpendicular a la costa de Santurtzi.

Paralelamente, entre 1894 y 1901 se llevaron a cabo las obras del contramuelle de Algorta para frenar las corrientes de marea y cerrar por el E el área abrigada del puerto exterior. Su consecuencia inmediata fue la acelerada

desaparición de la playa de Las Arenas, lo que obligó a la Junta de Obras del Puerto a construir urgentemente el Muelle de Las Arenas y sobre él un paseo.

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 Portugalete y Santurtzi, y cuyo espacio intermedio fue rellenado para asentar los accesos ferroviarios del puerto exterior. De este modo desaparecieron la playa de Portugalete, los acantilados de Santurtzi y su puerto pesquero original.

La empresa más ambiciosa de los años 1960 fue la apertura del Canal de Deusto con el objetivo de mantener un trazado rectilíneo de fácil navegación en el tramo central del estuario entre Axpe y Abandoibarra. La idea original data de 1928 pero la situación económica y política de los años 1930 retrasaron su realización hasta 1968, aunque ya sólo como una dársena o puerto interior de Bilbao abierto aguas abajo de San Inazio, que se ha completado en 2019 sin eliminar el recorrido curvo de la Ría en Olabeaga.

Por último, el proyecto del Superpuerto planteaba el aprovechamiento total de la bahía exterior del Abra cerrando la misma con dos diques de grandes dimensiones. Esta tercera etapa comenzó con la instalación en Somorrostro en el año 1968 de una refinería que necesitaba unas instalaciones portuarias para recibir el crudo transportado por los grandes petroleros.

El Espigón de Punta Lucero fue construido transversalmente al punto más externo del Abra en 1977. El dique de Punta Galea que completaría el cierre de la bahía se inició en 1976 pero se paralizó posteriormente.

Parada 2 Enekuri. Relleno sedimentario holoceno: ascenso del nivel marino

Introducción

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-Ibaizabal y sus cuatro afluentes (Kadagua, Asua, Galindo y Gobelás) que descargan en el cauce principal (Fig. 2.1).

Las secuencias sedimentarias holocenas estudiadas se perforaron durante el periodo 1988-1990 como parte del estudio geológico para la construcción del Ferrocarril Metropolitano de Bilbao y en 1998 como parte de diversos trabajos de ingeniería civil que fueron llevados a cabo por las autoridades locales. Estos sondeos fueron obtenidos en las áreas ocupadas del estuario original, utilizando una perforadora de roto-percusión hasta alcanzar el sustrato cretácico. Se muestran, a modo de ejemplo, los resultados obtenidos en 2 de ellos (Leorri y Cearreta, 2004).

2.2). La base, está compuesta por gravas redondeadas, arena y arcilla amarilla con escasos caparazones de foraminíferos. Este tramo se interpreta como un medio fluvial de edad Tardiglaciaria. La Asociación de Foraminíferos AF 3 está formada por fango arenoso con unos pocos restos de plantas y bioclastos. La asociación está dominada por *Haynesina germanica*, *Ammonia tepida* y *Elphidium oceanense*. Contiene una abundancia moderada de especies, un número muy elevado de caparazones y un porcentaje muy bajo de foraminíferos marinos (media 13%). A -8,0 m de profundidad se ha datado una muestra de madera, obteniendo una edad de 8.390 años cal BP. Se interpreta como un medio salobre e intermareal de fango arenoso. La AF 2 está compuesta por arena con bioclastos y algunos restos de plantas. La asociación de foraminíferos dominante está formada por *Lobatula lobatula*, *A. tepida* y *H. germanica*. Esta asociación contiene abundantes especies y caparazones. El porcentaje de individuos

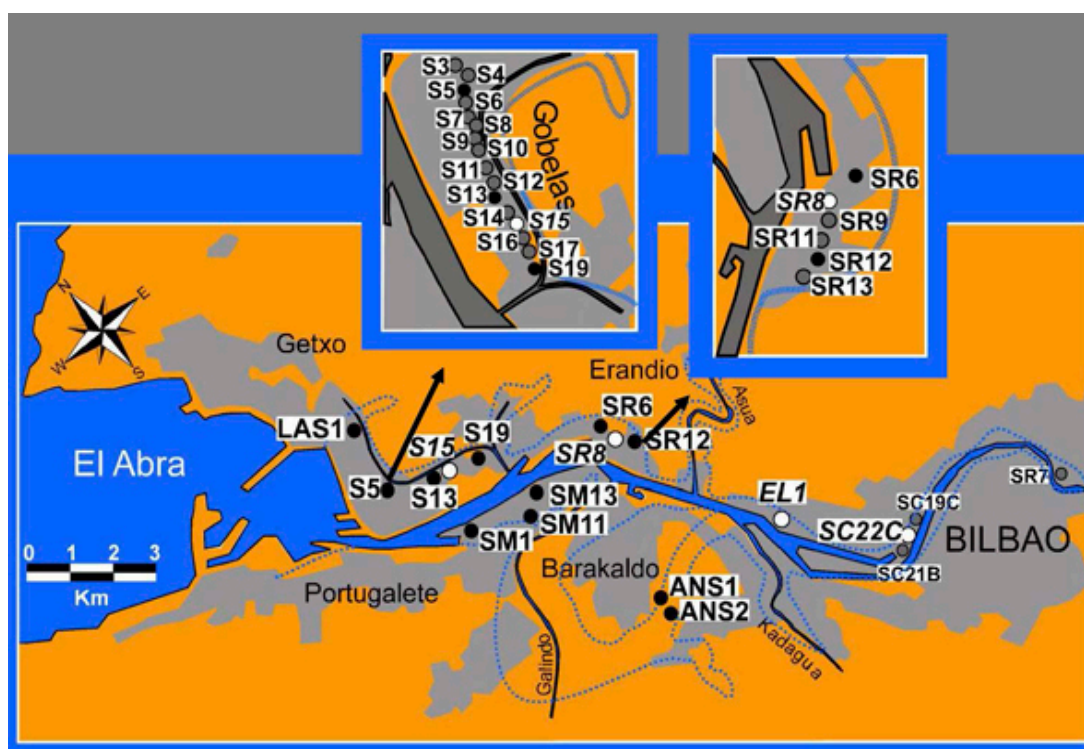


Fig. 2.1. Localización de los sondeos analizados en la Ría de Bilbao. Los puntos blancos representan aquellos estudiados por Cearreta (1998b), los puntos negros aquellos que fueron analizados en Leorri y Cearreta (2004) y los puntos grises corresponden a otros sondeos perforados durante el proyecto constructivo del Ferrocarril Metropolitano de Bilbao. La línea discontinua muestra la extensión original de los dominios estuarinos holocenos y las zonas sombreadas corresponden a las zonas urbanas (modificada de Leorri y Cearreta, 2004).

Sondeos holocenos

El sondeo SR6 fue perforado en la orilla derecha de la zona media del estuario (longitud 26,50 m). Basado en su contenido de foraminíferos, puede dividirse en cuatro zonas diferentes (Fig.

marinos transportados es muy elevado (media 62%). Se trata de un medio marino-proximal, intermareal y arenoso. Este medio se desarrolló, al menos, desde 4.815 a 1.220 años cal BP. Finalmente, AF 1 está representada por arena fangosa con bioclastos. La asociación de

foraminíferos está dominada por *H. germanica*, *Criboelphidium williamsoni*, *L. lobatula* y *A. tepida*. El número de especies es alto, al igual que el número de caparazones, mientras que el contenido en foraminíferos marinos es bajo, indicando un medio salobre, intermareal y de arena fangosa, que fue característico de esta zona estuarina hasta su ocupación humana en el siglo XIX.

Por su parte, el sondeo LAS1 (27,40 m) fue perforado en la orilla derecha del frente marino (Fig. 2.1). La secuencia sedimentaria de este sondeo, basada en su contenido en foraminíferos, se puede dividir en 2 zonas (Fig. 2.2). La AF 2, presente en la base del sondeo, se compone de arena rojiza con bioclastos y restos de plantas. La asociación está dominada exclusivamente por *L. lobatula*. La abundancia de especies es alta y el contenido en foraminíferos marinos es extremadamente elevado (media 89%), mientras que el número de caparazones es bajo. Esta AF 2 se interpreta como un depósito marino-proximal, intermareal y arenoso. Por encima, AF 1 está formada por arena rojiza con restos de plantas y gasterópodos terrestres. La asociación de foraminíferos está dominada por *L. lobatula* y *A. tepida*. El número de especies es elevado y el contenido en foraminíferos marinos es muy alto (media 76%). El bajo número de caparazones, 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 por

radiocarbono indica que este medio empezó a formarse hace 2.810 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).

Se han analizado las asociaciones de foraminíferos contenidas en las sucesiones sedimentarias de 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 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

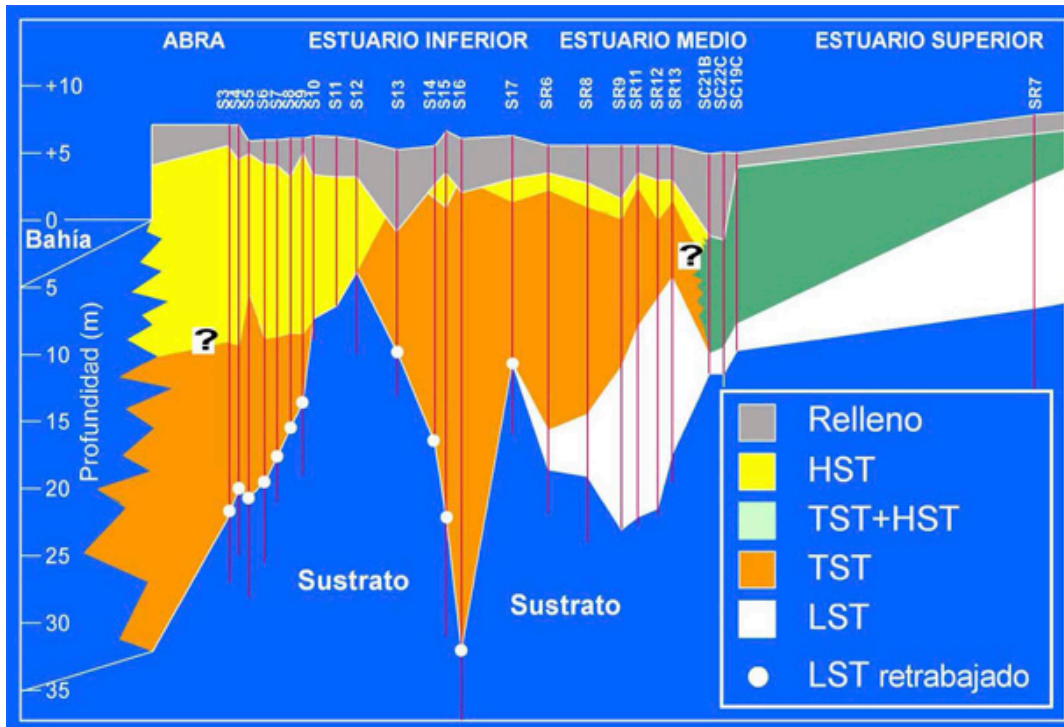


Fig. 2.2. Interpretación del relleno holoceno en la Ría de Bilbao según la estratigrafía de secuencias. Las líneas verticales indican los diferentes sondeos perforados en el margen derecho del estuario. LST: cortejo sedimentario del nivel marino bajo; TST: cortejo sedimentario transgresivo; HST: cortejo sedimentario del nivel marino alto (modificada de Leorri y Cearreta, 2004).

vez, por diferentes conjuntos de foraminíferos separados por superficies estratigráficas continuas, que constituyen unos buenos marcadores para la correlación. La Figura 2.2 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 marino bajo durante la época Tardiglaciario (cortejo de nivel del mar bajo-LST). Durante la transgresión marina (8.500-3.000 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 marinos) 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 3.000 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 (Leorri y Cearreta, 2004).

Según García-Artola et al. (2018), el aumento relativo del nivel del mar en la costa vasca durante el Holoceno puede resumirse en tres fases principales (Fig. 2.3): (1) ascenso rápido cuantificado en unos $6,3 \pm 0,8$ mm/año que tuvo lugar desde los 9.000 hasta 7.000 años cal BP; (2) reducción considerable de la tasa de elevación hasta los $0,7 \pm 0,5$ mm/año desde los 7.000 hasta 4.000 años cal BP; y (3) mayor ralentización desde entonces hasta el siglo XX ($0,5 \pm 0,5$ mm/año). Este avance transgresivo holoceno constituye el proceso responsable de las secuencias sedimentarias presentes en este estuario.

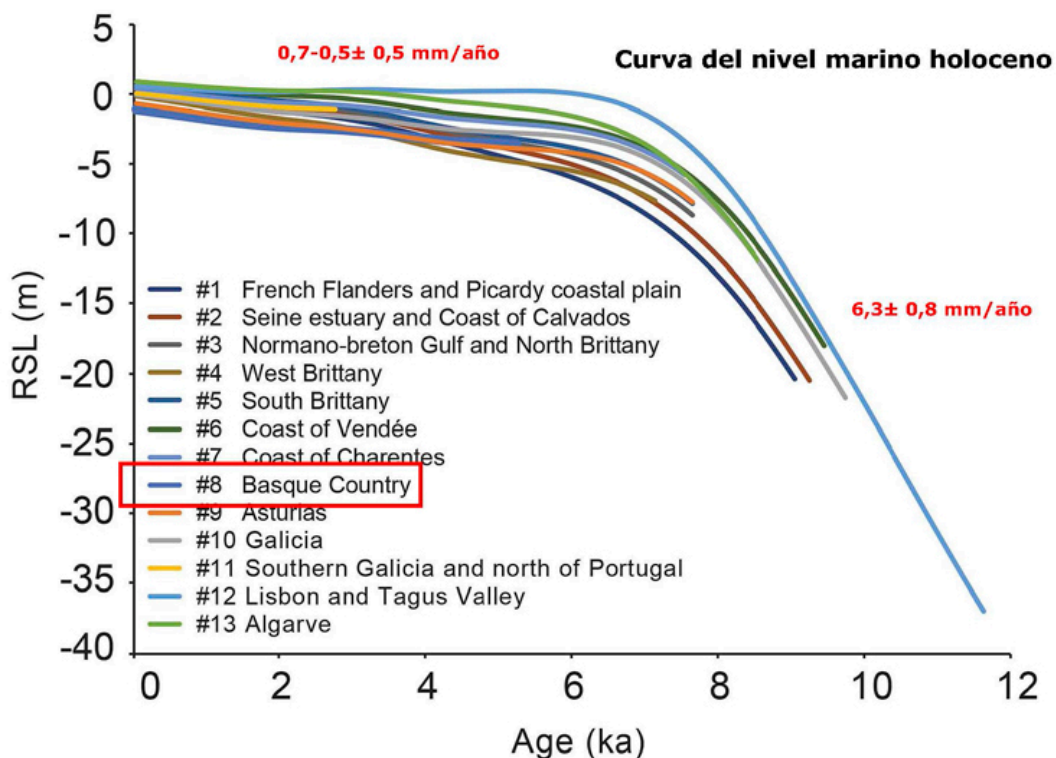


Fig. 2.3. Estimaciones medias del ascenso relativo del nivel marino para diferentes regiones costeras del litoral atlántico de Europa durante el Holoceno (modificada de García-Artola et al., 2018).

Parada 3 Las Arenas: Registro sedimentario reciente: desarrollo industrial del estuario

Introducción

La Ría de Bilbao, también conocida como el estuario de Nervión-Ibaizabal, presenta características mesomareales (variación media de las mareas 2,5 m, rango desde 1 m en mareas muertas a 4,5 m en mareas vivas). Su reciente transformación ambiental ha estado estrechamente relacionada con la explotación local de minerales de Fe y el posterior desarrollo industrial y urbano. Desde que la primera industria de hierro y acero se construyera sobre sus marismas en 1854, todos los dominios estuarinos originales fueron eliminados debido a la ocupación humana y, en la actualidad, se ha convertido en un canal de marea artificial (15 km de largo, 50–150 m de ancho, y 4–10 m de profundidad) que cruza el área metropolitana de Bilbao (alrededor de 900.000 habitantes) y descarga en la bahía del Abra (3.5 km de anchura media, hasta 30 m de profundidad). Este estuario ha recibido los vertidos incontrolados de enormes cantidades de desechos mineros, domésticos e industriales no tratados durante más de un siglo, lo que degradó gravemente sus condiciones físico-químicas originales. Las concentraciones de oxígeno disuelto en sus aguas disminuyeron

coprostanol, compuestos orgánicos, etc. Como consecuencia de este desarrollo insostenible, ya en la década de 1970 el estuario de Bilbao podía describirse como una cloaca navegable que atravesaba una de las ciudades más contaminadas del mundo.

Evolución ambiental reciente

Las características naturales de la ría de Bilbao fueron dramáticamente modificadas por el desarrollo urbano, industrial y portuario. La explotación del abundante mineral de hierro local condujo a su desarrollo industrial temprano a mediados del siglo XIX. El estuario original se redujo rápidamente de tamaño a través de la ocupación de sus dominios para formar un canal mareal como un curso de agua navegable desde la ciudad hasta el mar abierto, completado en 1885 (Cearreta et al., 2000). Durante los últimos 150 años, el estuario de Bilbao ha recibido contaminantes de muchas fuentes. Sin embargo, se produjo una disminución significativa en el flujo de materia orgánica y contaminantes durante los años 1980 y 1990 debido a la implementación de políticas de protección ambiental, además del cierre de algunas fábricas importantes y a la mejora de



Fig. 3.1. Localización de las muestras superficiales analizadas en la Ría de Bilbao desde 1997 (modificada de Cearreta et al., 2000).

dramáticamente, lo que afectó considerablemente a la biota del estuario y provocó el desarrollo de una etapa afaunal a lo largo de sus llanuras intermareales donde prevalecieron condiciones anóxicas (González Oreja y Saiz Salinas, 1998). La calidad microbiológica del agua era deficiente, mientras que los sedimentos mostraron graves niveles de degradación debido a sus elevadas concentraciones de productos químicos como hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH), bifenilos policlorados (PCB), metales pesados,

los sistemas de tratamiento de vertidos, con un plan institucional de saneamiento integral y limpieza que comenzó en 1984. Este plan incluye 170 km de red de alcantarillado que transporta las aguas residuales a una planta central de tratamiento en Galindo (Fig. 3.1).

Los programas de monitorización a largo plazo desarrollados en este estuario confirman mejoras considerables en las condiciones del agua, la calidad de los sedimentos superficiales y los parámetros ecológicos. Con este fin, se

recolectaron sedimentos superficiales cada 3 años (período 1997–2017) en el mes de febrero durante la marea baja en 14 puntos intermareales que cubren todo el canal estuarino y uno en el área de la bahía abierta (Fig. 3.1) que fueron analizados geoquímica y micropaleontológicamente. Adicionalmente, el estudio inicial de testigos sedimentarios realizado por Cearreta et al. (2000, 2002) proporcionó una perspectiva histórica sobre la magnitud del problema, permitiendo que se definieran tres zonas ambientales diferentes desde la superficie hacia abajo: (i) Industrial sin microfauna, que contiene concentraciones extremas de metales y casi estéril de foraminíferos autóctonos (desde 1950); (ii) Industrial con microfauna, donde coexisten contenidos elevados de metales con asociaciones de foraminíferos relativamente abundantes y diversas (período 1850s-1950s); y (iii) pre-industrial, que muestra concentraciones naturales de metales y asociaciones de foraminíferos muy abundantes y diversas (antes de la década de 1850) (Figs. 3.2 y 3.3).

Según Leorri et al. (2008), se produjo una disminución general en las concentraciones de metales desde 1997 a 2003, probablemente relacionada con una reducción significativa de las fuentes contaminantes y la implementación del tratamiento biológico en la planta depuradora de Galindo desde 2001. A pesar de la mejora observada, en 2003 la mayoría de las muestras del estuario medio e inferior aún excedían los valores adversos para la biota (Effect Range Medium, ERM) al menos en un elemento (Zn), lo que sugiere la persistencia de una contaminación significativa en estas áreas. En los años siguientes, se observaron cambios limitados en los contenidos en metales de diferentes estaciones de muestreo a lo largo de las sucesivas campañas de monitorización. Una interpretación detallada de estas variaciones es difícil debido a diferentes factores. Por un lado, dada la posición central del estuario dentro del Bilbao metropolitano, los depósitos sedimentarios pueden verse afectados por una amplia variedad de factores, tales como entradas de fuentes contaminantes conocidas/desconocidas, cambios en los sistemas de producción, dragados, remodelaciones a lo largo de las orillas o desarrollo de nuevas infraestructuras de ingeniería civil.

De hecho, investigaciones previas relacionaron los cambios en la composición de los sedimentos locales con la ejecución de dragados y la construcción de instalaciones portuarias. Las condiciones relativamente favorables alcanzadas en 2003 en el estuario superior (estaciones 1–5), sin muestras que excediesen los umbrales ERM, se extendieron en 2017 a la mayoría de los puntos de muestreo. Sin embargo, las concentraciones de metales se mantuvieron más altas que los niveles de fondo locales y persistieron importantes enriquecimientos alrededor de los principales afluentes: Galindo y Gobelas. En estos dos lugares, los niveles de la mayoría de los metales fueron al menos dos veces superiores a los determinados en el resto de los puntos estudiados, con concentraciones de tres elementos más altas que sus valores ERM (Pb, Zn y Ni en Galindo y Pb, Zn, y Cu en Gobelas). Además, los contenidos determinados en Axpe y Arriluze (en la bahía) también estuvieron por encima del valor ERM para Zn. A pesar de la mejora observada (en 1997 todas las muestras superaron el ERM de Zn), es probable que este elemento continúe siendo el contaminante más extendido en la ría de Bilbao.

La susceptibilidad magnética de las muestras superficiales recolectadas en 2017 muestra que los valores obtenidos son muy superiores a los valores naturales de fondo, mostrando sus niveles de enriquecimiento más altos en Galindo y Gobelas. Debido a que la susceptibilidad magnética puede considerarse como proporcional a la abundancia de materiales ferromagnéticos dentro de las muestras, la contaminación en el estuario de Bilbao se refleja también en sus mayores abundancias de materiales ferromagnéticos. Esto es exactamente lo que se puede esperar en un área industrial dominada por la industria siderometalúrgica y otras industrias impulsadas principalmente por la quema de combustibles fósiles (carbón), que constituyen fuentes bien conocidas de abundantes materiales ferromagnéticos en forma de escorias, cenizas volantes, esférulas, etc. Además, las actividades de extracción de minerales ricos en Fe llevadas a cabo dentro de la cuenca hidrográfica de Nervión para alimentar a esta industria metalúrgica también podrían haber contribuido a este incremento de los contaminantes ferromagnéticos (Irabien et al., 2018; Villasante-Marcos et al., 2019).

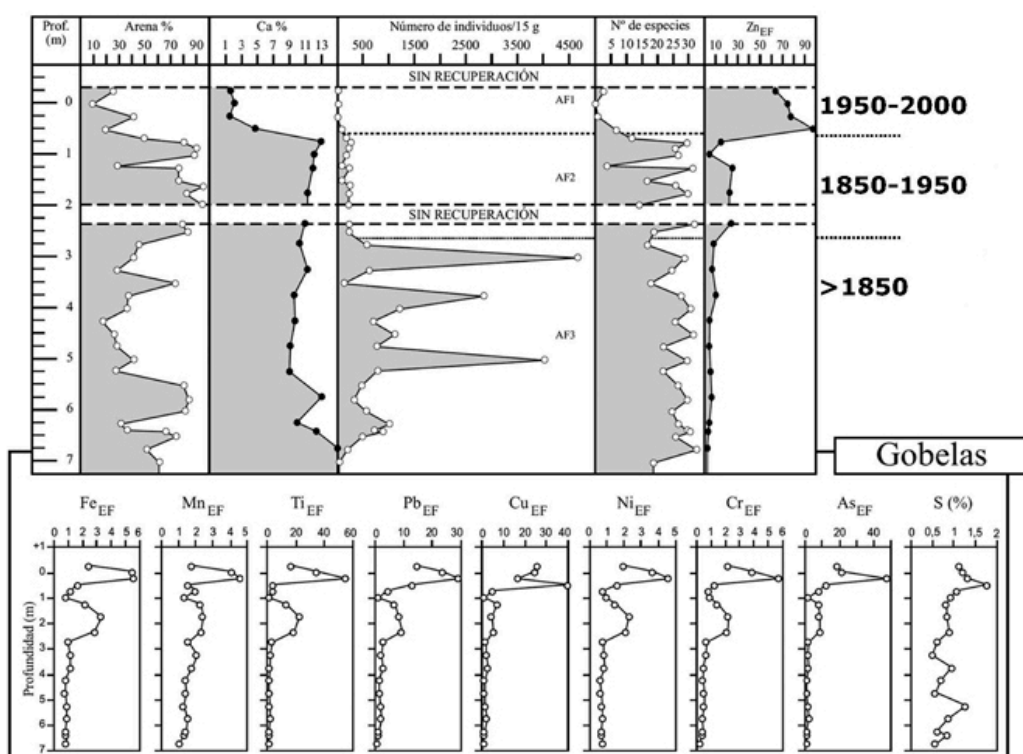


Fig. 3.2. Información sedimentológica, geoquímica y micropaleontológica del sondeo Gobelas perforado en la Ría de Bilbao (modificada de Cearreta et al., 2002).

El estudio de las asociaciones de foraminíferos indica que tanto el número de individuos vivos por unidad de volumen de sedimento como el número de especies aumentaron durante el período de muestreo. Así, los foraminíferos vivos fueron extremadamente bajos entre 1997 y 2006. Esto sugiere que las condiciones ambientales fueron desfavorables para su desarrollo y reproducción. Se encontraron muestras estériles de foraminíferos en todo el estuario. Los valores de abundancia absoluta con más de 100 foraminíferos por 80 cm³ se alcanzaron en 1997 solo en la zona de la bahía (Arriluze) y posteriormente (en 2006) en la estación estuarina más inferior (Benedicta). Sus escasos individuos se distribuyeron al azar, lo que sugiere que los foraminíferos encontrados dentro del estuario fueron transportados por las corrientes mareales y no llegaron a reproducirse dentro del estuario (Cearreta et al., 2000). Sin embargo, desde el año 2009, la abundancia de foraminíferos vivos experimentó un notable crecimiento. La colonización de foraminíferos se trasladó claramente desde los tramos inferiores a las zonas superiores del estuario y, para 2014, todas las muestras contenían un número de individuos vivos entre moderado y alto. Los valores medios de abundancia fueron variables y se multiplicaron por diez a lo largo del periodo de estudio desde 162 (rango 15-644) en 2009, 311 (45-966) en 2012, 1603 (123-2997) en 2014, y 626 (64-1714) en 2017. Las especies más abundantes encontradas desde 2009 fueron solo tres taxones, que en conjunto representan el 99% de las asociaciones vivas a

lo largo del estuario, y sus abundancias relativas en 2017 fueron *Ammonia tepida* (media 63%), *Haynesina germanica* (19%) y *Elphidium oceanense* (17%). Después de un largo período azoico (desde 1950), relacionado principalmente con la limitación de oxígeno en el agua y el sedimento causada por los vertidos urbanos e industriales (Cearreta et al., 2002), los datos obtenidos reflejan una disminución en las concentraciones de metales desde 2003, mientras que las asociaciones de foraminíferos comenzaron a aumentar más tarde, a partir de 2009. Durante los últimos años, coexisten abundancias de foraminíferos moderadas a altas con niveles variables de metales y susceptibilidad magnética, y se han registrado tendencias crecientes de foraminíferos incluso en puntos de muestreo donde los contenidos de metales son superiores a los valores ERM (como Gobelas y Axpe).

Irabien et al. (2018) recolectaron siete sondeos cortos (20 cm de largo) a lo largo del estuario con el fin de determinar las características temporales de la deposición sedimentaria más reciente. A pesar de que Cundy et al. (2003) ya determinaron que la datación radiométrica de estos depósitos sedimentarios era muy problemática debido al frecuente retrabajamiento de los sedimentos y a cambios drásticos en su composición, registros históricos previos de la contaminación indicaban que durante los primeros años del siglo XXI el estuario se encontraba cubierto por una capa extremadamente contaminada de sedimentos

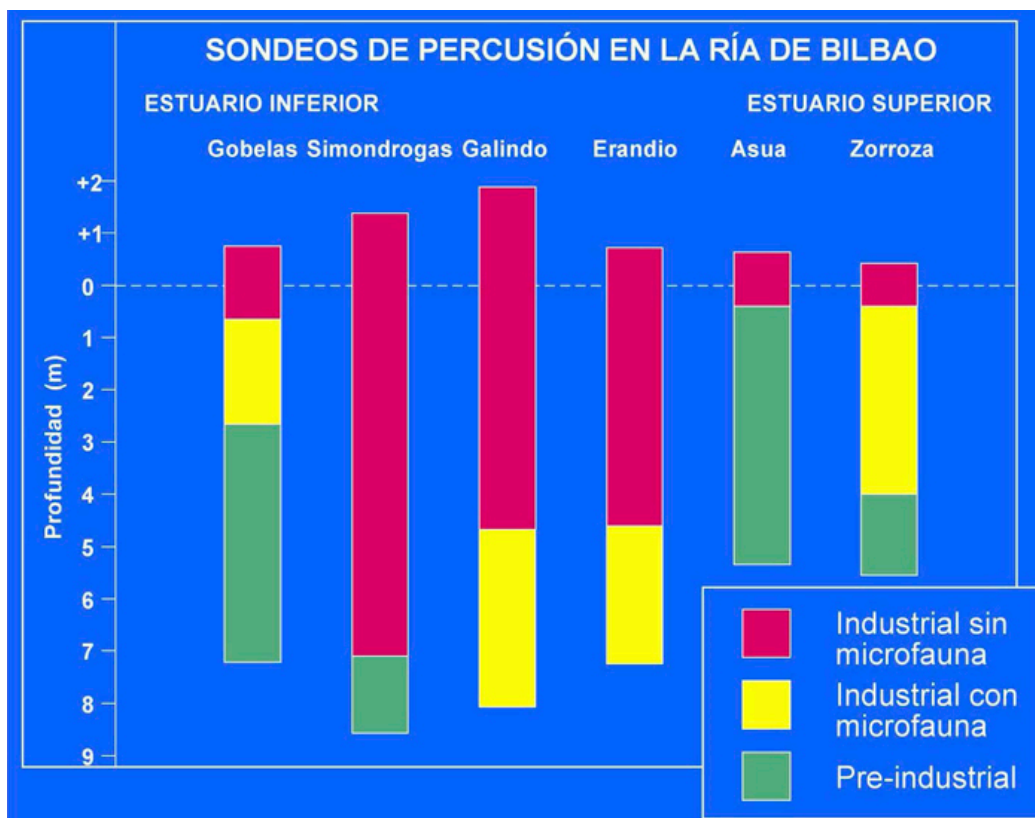


Fig. 3.3. Interpretación ambiental de los sondeos de época industrial perforados en la Ría de Bilbao en base a sus contenido geoquímico y micropaleontológico (modificada de Cearreta et al., 2002).

azoicos (Cearreta et al., 2002; Leorri et al., 2008). En 2017, los contenidos de foraminíferos mostraron una tendencia general creciente y es probable que coexistan en situaciones contradictorias con respecto a las concentraciones de metales: la calidad geoquímica de los sedimentos superficiales de cinco estaciones (Zorroza, Rontegi, Erandio, Simondrogas y Benedicta) mejoraron significativamente, alcanzando valores por debajo de los ERM, mientras que los sedimentos superficiales en Galindo y Gobelas permanecen claramente enriquecidos en estos metales. Sin embargo, es importante tener en cuenta que las concentraciones de metales (excepto Ni) y la susceptibilidad magnética (y, por lo tanto, el contenido ferromagnético) en todos los puntos de muestreo se mantuvieron muy por encima de los valores de fondo locales pre-industriales.

Los datos obtenidos de los sondeos recientes permiten actualizar la reconstrucción de la transformación ambiental del estuario de Bilbao iniciada por Cearreta et al. (2000, 2002) (Fig. 3.4). En el año 2000, los depósitos del fondo del estuario se cubrieron con una capa gruesa variable (0,80–8,5 m) de sedimentos azoicos altamente enriquecidos en metales (la llamada "zona industrial sin microfauna"). Esta etapa aún se puede reconocer en los sedimentos actuales de Simondrogas, Gobelas y Galindo, donde las

muestras presentan contenidos extremadamente bajos de foraminíferos (<40 caparazones/15 g) y concentraciones muy elevadas de metales. Por encima de esta capa, todos los sondeos (excepto Gobelas) exhiben una "zona de transición", donde la abundancia de foraminíferos, aunque es muy baja, muestra un aumento significativo (40-100 caparazones/15 g). Finalmente, hay una tercera zona caracterizada por densidades de foraminíferos moderadas a altas (100->3000 caparazones/15 g) y niveles mejorados (pero muy variables) de metales y susceptibilidad magnética. Las características de esta capa se parecen mucho a las que se encuentran en la "zona industrial con microfauna" depositada durante la primera etapa histórica de deterioro del estuario (datada entre 1850–1950 por Cearreta et al., 2000). A principios del siglo XXI, los cambios socioeconómicos obligaron al cambio en el modelo productivo en la ciudad de Bilbao, desde una economía fundamentada en la producción industrial-siderúrgica a una economía de servicios, y las medidas de reducción de la contaminación por aguas residuales fueron clave para la recuperación biológica de la microfauna. Por lo tanto, aunque las condiciones ambientales originales aún están muy lejos de alcanzarse, esta capa superior puede denominarse "zona post-industrial".

Los resultados obtenidos resaltan la necesidad de incorporar una perspectiva estratigráfica en el estudio de las zonas altamente industrializadas, como es el caso del estuario de Bilbao, donde los procesos de regeneración ambiental en curso coexisten con un legado negativo que perdura en forma de grandes cantidades de materiales contaminados enterrados en los sedimentos de la ría. Aunque algunos cambios inducidos por el ser humano son completamente irreversibles (como, por ejemplo, la pérdida de las características morfológicas originales del estuario debido a la extensa ocupación física de sus dominios originales), algunos otros factores, como la calidad geoquímica de las aguas y los sedimentos, y el desarrollo de comunidades biológicas, pueden comenzar a mejorar, siempre que tengan la oportunidad. Un seguimiento regular de la evolución de las nuevas capas sedimentarias que se vayan depositando puede proporcionar información útil para promover decisiones correctas sobre la gestión ambiental que se llevará a cabo y para ayudar a mantener

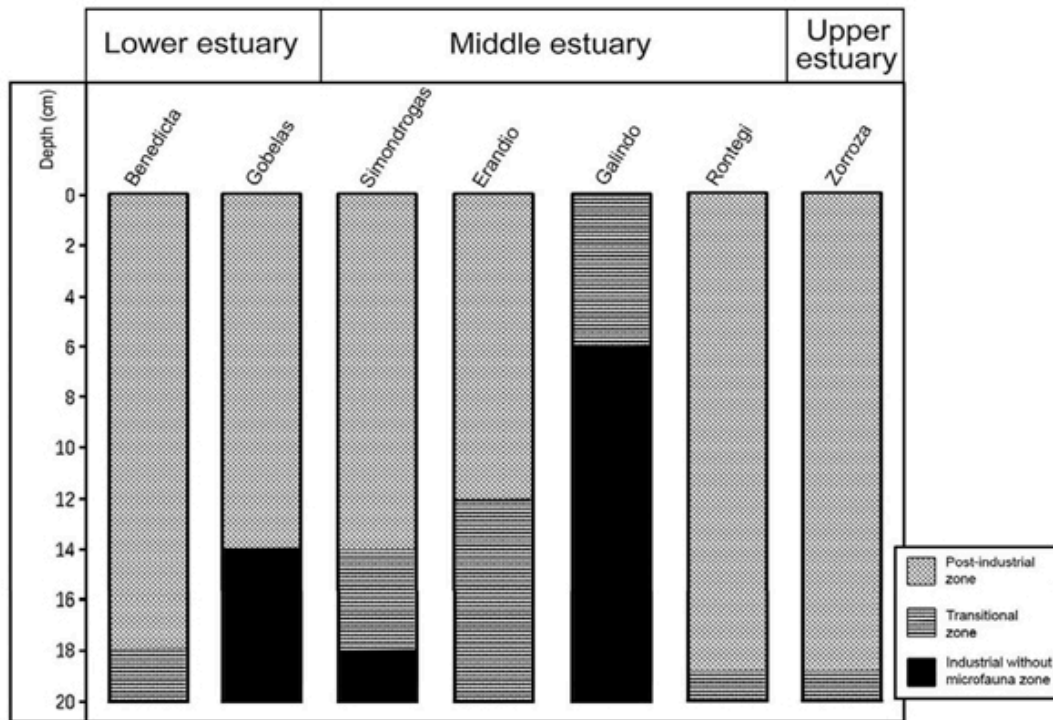


Fig. 3.4. Interpretación ambiental de los sondeos de época post-industrial perforados en la Ría de Bilbao en base a sus contenido geoquímico y micropaleontológico (tomada de Irabien et al., 2018).

el frágil equilibrio entre la regeneración ambiental y las actividades humanas.

Parada 4 El Abra interior. Eventos climáticos extremos e impactos antropogénicos

Introducción

La mayor parte de los estudios en la Ría de Bilbao utilizando testigos sedimentarios se han centrado en los depósitos contaminados que cubren el fondo del cauce estuarino, donde la distribución vertical de metales pesados y radionucleidos está controlada en gran medida por actividades antropogénicas como los aportes de residuos mineros e industriales y las operaciones de dragado (Cearreta et al., 2000, 2002). La parte superior de la ría está formada por un canal estrecho (50-150 m de ancho), poco profundo (4-10 m de profundidad) y muy estratificado (de unos 15 km de largo) rodeado por una densa red urbana e industrial. Los tramos inferiores, por su parte, están ocupados por una ensenada costera en forma de embudo conocida como el Abra de Bilbao, con una superficie total de unos 30 km², una profundidad máxima de 30 m y una anchura de unos 4 km. Contiene además el 95% del agua total de la ría. A finales del siglo XIX se construyeron dos espigones en Santurtzi y Algorta (Fig. 4.1) para configurar un puerto exterior, dividiendo la bahía en dos zonas principales: el Abra exterior (donde se desarrolla la mayor parte de la actividad portuaria en la actualidad) y el Abra interior (área de interés de esta salida de campo). Esta infraestructura provocó un cambio significativo en la hidrodinámica del sistema, impidiendo la entrada de arenas marinas en el Abra interior y favoreciendo así la sedimentación fangosa.

Así, los procesos inducidos por el ser humano no sólo alteraron las características morfológicas originales de todo el estuario sino también su régimen sedimentario. Como consecuencia, los depósitos arenosos de la playa de Las Arenas (Fig. 4.1) casi desaparecieron, y en la primera década del siglo XX se realizaron obras de refuerzo para evitar una mayor erosión. Posteriormente, la construcción de instalaciones portuarias como los amarres del Real Club Marítimo (años 1950), el nuevo puerto deportivo de Getxo (1999) y atraques para grandes cruceros (2006 y 2012) redujeron la bahía interior del Abra a su tamaño actual (unos 2 km²).

Estudios previos en la bahía detectaron concentraciones elevadas de metales en los sedimentos superficiales (Guerrero Pérez et al., 1988; Swindlehurst y Johnston, 1991). En 2014, los contenidos elevados de metales (superiores a los encontrados en 2009; Fdez-Ortiz de Vallejuelo et al., 2010) se atribuyeron a la construcción de un nuevo espigón para cruceros turísticos de larga distancia en 2012 (Rodríguez-Irretagoiena et al., 2016).

Inundaciones de Bilbao y regeneración ambiental

En septiembre de 2015 se recogieron seis testigos de sedimento (entre 50 y 69 cm de longitud) utilizando un muestreador hammer



Fig. 4.1. Localización geográfica del Abra interior de Bilbao con la posición de los 6 sondeos estudiados (Abra1-Abra6) (tomada de Irabien et al., 2019).

corer (diámetro interno de 10 cm) operado por buzos, en dos transectos del Abra interior (dos réplicas en cada sitio de muestreo) (Fig. 4.1).

La distribución vertical de todas las variables estudiadas es muy similar (Fig. 4.2), lo que permite distinguir claramente tres intervalos de profundidad (DI) diferentes. Los sedimentos recolectados por debajo de los ~45 cm de profundidad (DI1) muestran contenidos extremadamente altos de metales y están particularmente enriquecidos en Pb. En muestras preindustriales locales y en casi todos los sedimentos superficiales recolectados a lo largo del programa de monitorización ambiental desarrollado en el cauce estuarino desde 1997 hasta 2017 (Cearreta et al., 2000; Irabien et al., 2018; Leorri et al., 2008), los contenidos de Pb son claramente inferiores a las concentraciones de Zn ($Pb/Zn < 0,35$ y $0,5$ respectivamente). Por el contrario, como se observa en algunas muestras de sedimentos contaminados enterrados aguas arriba del Abra (Irabien et al., 2018), en DI1 los niveles de Pb son similares o incluso superiores a los de Zn ($0,8 < Pb/Zn < 1,6$), mostrando un aumento de la contaminación por Pb en el pasado. El intervalo DI1 fangoso (mediana del contenido de arena 6%) contiene una abundancia de foraminíferos muy baja (32 caparazones/15 g) dominados por *Ammonia tepida* (mediana 28%), *Lobatula lobatula* (18%), *Rosalina irregularis* (13%), *Bulimina gibba* (11%), *Haynesina germanica* (6%) y *Quinqueloculina seminula* (6%). El número de especies es bajo (7), el contenido de foraminíferos marinos es alto (62%) y los caparazones hialinos son dominantes (91%), con una contribución significativa de las especies porcelanáceas (8%).

El intervalo DI2, ~45-25 cm de profundidad, se caracteriza por la aparición de cambios significativos en el tamaño de grano (picos arenosos), una disminución en las concentraciones de metales (los contenidos mínimos son al menos un orden de magnitud más bajos que los encontrados previamente en DI1), y unas relaciones Pb/Zn que oscilan entre 0,55 y 0,8. Este intervalo de lodo arenoso (contenido de arena 20%) muestra la presencia dominante de *A. tepida* (26%), *R. irregularis* (24%), *H. germanica* (16%) y *L. lobatula* (15%). La asociación está compuesta por un número moderado de foraminíferos (235 caparazones/15 g), de especies (15), y de taxones marinos (53%) y los caparazones hialinos son muy abundantes (94%) con un contenido porcelanáceo inferior al intervalo DI1 (5%).

Los perfiles en profundidad de $^{210}Pb_{ex}$ en los tres testigos muestran una tendencia general decreciente con la profundidad, pero en el intervalo DI2, las actividades de $^{210}Pb_{ex}$ fueron pequeñas o nulas (Fig. 4.2). Si bien esto podría sugerir que DI2 se depositó hace >100 años, la presencia de mayores actividades de $^{210}Pb_{ex}$ en

sedimentos por debajo de este nivel (en el intervalo DI1) en los testigos Abra1 y Abra3 (la parte inferior del testigo Abra2 no se recuperó), además de la presencia de ^{137}Cs en ambos intervalos (DI1 y DI2), indican que la deposición tuvo lugar después de 1952 CE. La pequeña o nula actividad de $^{210}Pb_{ex}$ en este intervalo probablemente fue causada por un evento sedimentario que transportaba partículas, muy probablemente suelos de captación erosionados, en equilibrio ^{210}Pb - ^{226}Ra .

El testigo Abra1 mostró un amplio intervalo de equilibrio (26–42 cm). Su inventario ausente se calculó utilizando el método de tasa de acumulación (Sanchez-Cabeza y Ruiz-Fernández, 2012) por regresión lineal, y la fecha de este intervalo fue compatible con las inundaciones catastróficas de Bilbao de 1983. Asumiendo que todos los intervalos de equilibrio o dilución en Abra2 y Abra3 fueron causados por el mismo evento, se utilizó el método de fecha de referencia para calcular el resto de los inventarios. El aumento dramático en las tasas de acumulación másica y los cambios de textura y composición confirman que DI2 corresponde a un evento sedimentario extraordinario. Este evento se identifica como las inundaciones de agosto de 1983, la peor catástrofe natural de la historia reciente del País Vasco, durante las cuales se transportaron al Abra interior cantidades importantes de sedimentos de grano grueso y más limpios.

Finalmente, la transición a la zona superior del testigo (DI3) está marcada por un aumento significativo en las concentraciones de metales (Fig. 4.2), que declina hacia los sedimentos más recientes. Contrariamente a los niveles medidos en DI1, los niveles de Pb son al menos la mitad de los de Zn ($Pb/Zn < 0,5$), lo que se aproxima a las proporciones de Pb/Zn determinadas aguas arriba en los materiales superficiales del canal estuarino monitorizados entre 1997 y 2017, y refleja un cambio en las fuentes de actividad antropogénica a lo largo del tiempo. Los sedimentos en DI3 vuelven a ser predominantemente finos (contenido de arena 6%), y se observa una densidad de foraminíferos (210 caparazones/15 g) y un número de especies (17) moderados. Las especies de foraminíferos están representadas principalmente por *A. tepida* (46%), *R. irregularis* (11%), *L. lobatula* (10%), *Eggerelloides scaber* (6%) y *B. gibba* (5%). Los foraminíferos marinos (44%) son menos abundantes que las formas estuarinas, y los caparazones hialinos siguen siendo muy dominantes (91%) con una abundancia remarcable de caparazones aglutinados (6%).

Sobre la base del análisis combinado de los resultados de los indicadores geoquímicos, de microfauna y radiométricos, es posible distinguir tres zonas ambientales diferentes dentro del registro sedimentario reciente de la bahía del Abra interior. La primera zona está representada

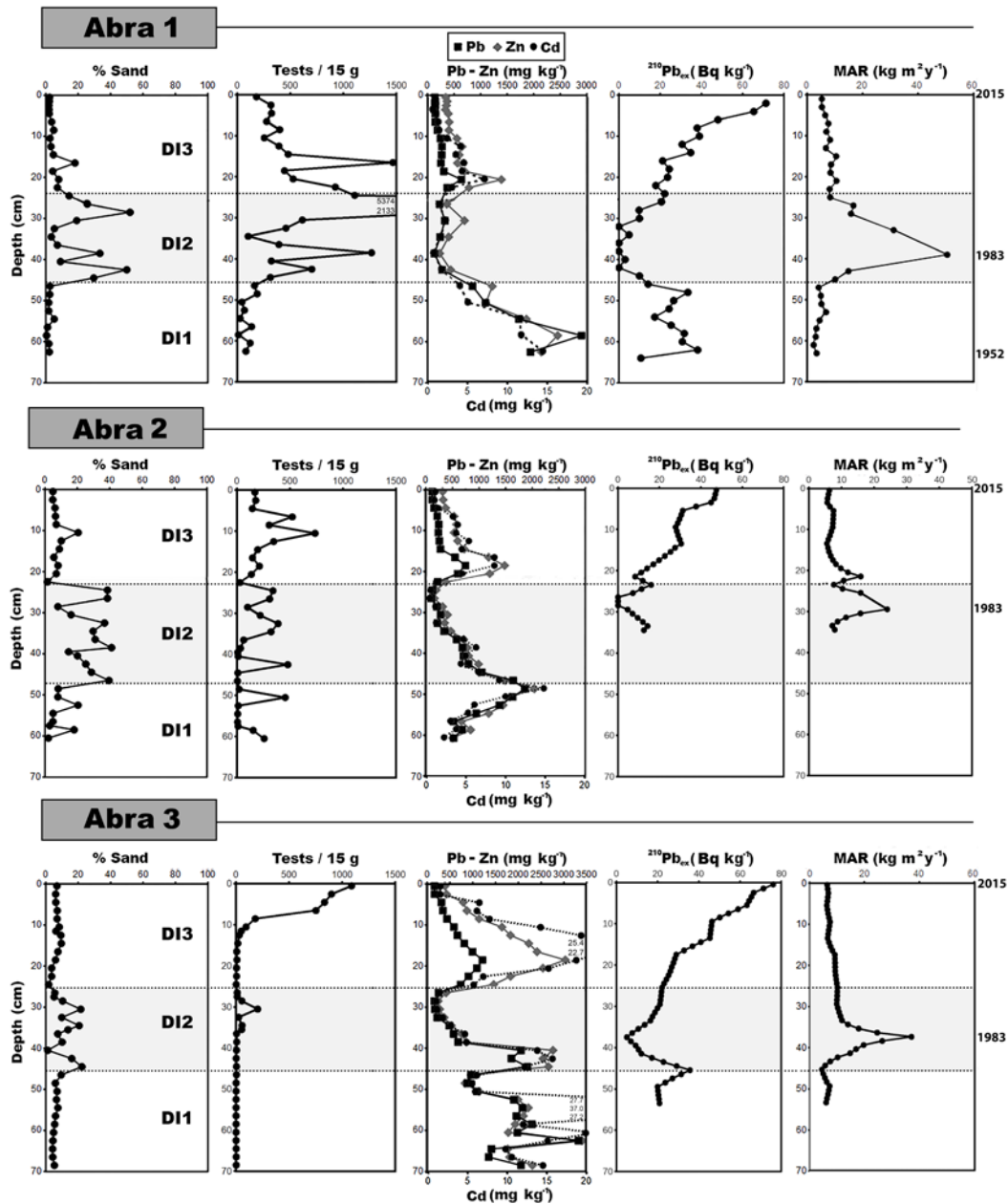


Fig. 4.2. Distribución en profundidad del contenido en arena (%), abundancia absoluta total de foraminíferos (15 g de sedimento seco), Pb, Zn y Cd (mg kg^{-1}), ^{210}Pb (Bq kg^{-1}) y velocidades de acumulación másica (MAR, $\text{kg m}^{-2} \text{y}^{-1}$) en los testigos Abra1, Abra2 y Abra3 (tomada de Irabien et al., 2019).

por el intervalo DI1 (por debajo de ~45 cm de profundidad), que solo se identifica en los testigos del transecto A (Fig. 4.2). Estos sedimentos fangosos revelan condiciones ambientales muy degradadas durante épocas pasadas de desarrollo insostenible. Están tan enriquecidos en Pb que las concentraciones de este metal en la mayoría de las muestras superan el valor límite superior establecido para "sedimentos no peligrosos" (1000 mg kg^{-1}), según el marco español para la caracterización de materiales de dragado (Buceta et al., 2015). Por lo tanto, es necesario realizar más estudios para determinar si estos sedimentos deben manejarse como desechos peligrosos o como

materiales altamente contaminados, lo cual es de particular importancia para las actividades de dragado. Además, los sedimentos también presentan altos niveles de Cd y Zn, que superan los valores de ERM propuestos por Long et al. (1995). Se han observado sedimentos altamente contaminados con concentraciones similares de metales en testigos de llanuras intermareales unos pocos kilómetros aguas arriba del estuario (Irabien et al., 2018), lo que confirma el papel de todo el sistema estuarino como sumidero de residuos industriales. La co-ocurrencia de Pb y Cd indica que pueden compartir una fuente común relacionada con la industria siderúrgica local (Legorburu et al., 2013). Los foraminíferos

bentónicos son muy escasos en esta zona basal y están compuestos por una mezcla limitada de especies marinas y estuarinas.

El siguiente intervalo (DI2) se puede reconocer en los testigos Abra1, Abra2, Abra3 y Abra4 (Figs. 4.1 y 4.2). Se caracteriza por la acumulación de capas arenosas con bajas concentraciones de metales intercaladas con sedimentos fangosos que presentan grados variables de contaminación. A pesar de que los valores decrecientes de los metales en regiones pobladas e industrializadas son a menudo consecuencia de una disminución de los aportes antrópicos, los datos del análisis isotópico confirman que en este caso están relacionados con la deposición de materiales removilizados durante las inundaciones extremas que afectaron al País Vasco en agosto de 1983 (Cearreta et al., 2017). La capa catastrófica es aquí “más limpia” que los materiales subyacentes, pero en otros lugares podría ser lo contrario, comprometiendo los esfuerzos de mejora ambiental. Por lo tanto, nuestros resultados enfatizan la necesidad de utilizar un enfoque multidisciplinar para interpretar de manera fiable el registro sedimentario reciente en las zonas costeras, donde las perturbaciones naturales a menudo interactúan con una amplia variedad de actividades humanas.

Las inundaciones de 1983 no tuvieron precedentes, ya que las precipitaciones durante tres días (24, 25 y 26 de agosto) igualaron el máximo mensual registrado en 125 años (Instituto Geológico y Minero de España, 1986). En tan solo 24 h (desde las 9:00 horas del viernes 26 hasta las 9:00 horas del sábado 27) las precipitaciones fueron de unos 500 mm. El caudal del río, que probablemente superó el período de retorno de 1000 años, provocó inundaciones generalizadas en toda la región (especialmente en las zonas estuarinas, donde el caudal máximo coincidió con la pleamar), 39 víctimas mortales y pérdidas económicas de

más de 800 millones de euros. Este evento meteorológico extremo fue consecuencia de la interacción de la advección cálida a través del Mediterráneo con una masa de aire polar en capas altas, lo que generó un sistema convectivo a mesoescala responsable de las lluvias inusualmente abundantes e intensas. Conocido en España como “gota fría” (Depresión Aislada en Niveles Altos, DANA), este fenómeno parece ser la principal amenaza de inundación regional. De hecho, las crecidas fluviales y repentinas exacerbadas por las variaciones de las mareas han sido identificadas como el principal riesgo al que se ha enfrentado periódicamente la ciudad de Bilbao a lo largo de su centenaria historia (Adán de Yarza, 1892). Desafortunadamente, se prevé que los fenómenos convectivos en el País Vasco aumenten en el futuro como resultado del calentamiento global, lo que incrementará el riesgo de eventos extremos de lluvia e inundaciones.

El movimiento hidrodinámico local en la bahía del Abra interior es inducido principalmente por las mareas, y se considera que la contribución del oleaje a las corrientes es insignificante (Grifoll et al., 2009). La salida media de agua dulce es relativamente baja y, para caudales fluviales más grandes, la pluma de descarga sale del estuario por la margen derecha y permanece adherida a la costa oriental (Mestres et al., 2014). Sin embargo, las corrientes de marea son desviadas por la morfología local, las infraestructuras humanas y la rotación terrestre, lo que da como resultado una corriente en el sentido de las agujas del reloj durante la marea baja (y en el sentido antihorario durante la marea alta) (Lugaresaresti Bilbao, 1994) que contribuye a la reubicación de sedimentos durante los eventos meteorológicos extremos como inundaciones y tormentas (Fig. 4.3).

Los foraminíferos bentónicos del intervalo DI2 más arenoso exhiben una mezcla de especies

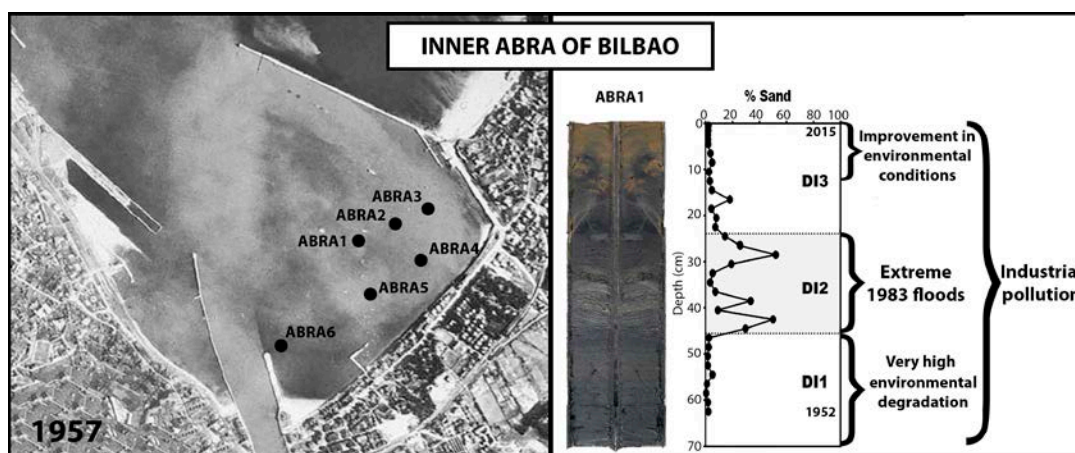


Fig. 4.3. Localización de los 6 sondeos perforados, corriente de salida mareal en sentido horario durante la bajamar en el año 1957, fotografía del testigo Abra1 y síntesis del registro sedimentario reciente en El Abra interior de Bilbao (tomada de Irabien et al., 2019).

estuarinas y marinas hialinas. Este conjunto se parece mucho a la asociación de especies de foraminíferos de los sedimentos arenosos de edad Holoceno que caracterizaron el estuario inferior de Bilbao (Leorri y Cearreta, 2004), lo que sugiere que podrían ser la fuente principal de los sedimentos arenosos acumulados en la bahía durante la inundación catastrófica de 1983. Sin embargo, los valores máximos de metales que se encuentran a unos 40–45 cm de profundidad en el testigo Abra3, que en términos generales muestran niveles aumentados de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, están relacionados más probablemente con la deposición de sedimentos contaminados removilizados. Las condiciones de flujo turbulento, que eliminan volúmenes considerables de sedimentos y sus contaminantes asociados, pueden exponer los sedimentos anóxicos a condiciones óxicas, lo que afecta la liberación y la biodisponibilidad de los contaminantes (Eggleton y Thomas, 2004). Las evidencias de un evento sedimentario en DI2 (cambios granulométricos y de composición, fuerte disminución en las actividades de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, cambios en las asociaciones de foraminíferos) confirman que las perturbaciones causadas por eventos climáticos extremos pueden agravar los impactos antropogénicos en las áreas costeras y marinas.

El intervalo superior del testigo (DI3) representa el período posterior a 1983 (Fig. 4.2). Aunque la tendencia general en las concentraciones de metales decrece hacia sedimentos más recientes, aún se mantienen elevadas concentraciones en la parte inferior. Esto no es sorprendente, ya que la mejora significativa de la calidad química en los sedimentos superficiales tuvo lugar en la ría de Bilbao desde 2000 hasta 2003 en adelante (Leorri et al., 2008). Excepto en el testigo Abra5, donde todas las muestras exceden el valor de ERM para Zn, en los otros registros sedimentarios las concentraciones de metales en las capas superiores están por debajo de los valores de ERM. De manera similar a lo observado en la zona del cauce estuarino (Irabien et al., 2018), el espesor de esta capa de sedimentos “más limpios” oscila entre 1 cm (Abra3) y 21 cm (Abra6). Además, este intervalo fangoso reciente muestra la mayor abundancia de foraminíferos estuarinos en comparación con las especies marinas, lo que hace este DI3 cualitativamente similar al intervalo DI1 pero con contenidos de foraminíferos mucho más altos, indicativos de la mejora en las condiciones ambientales necesarias para su supervivencia. Por lo tanto, las futuras acciones de gestión (operaciones de dragado, seguimiento de la recuperación natural) deben tener en cuenta no solo el legado histórico de los lugares contaminados, sino también los impactos actuales (físicoquímicos, biológicos, ecológicos) del proceso de regeneración.

Parada 5 Tunnelboca. Las playas cementadas de la revolución industrial

B. Martínez García. Dpto. de Geología, Sociedad de Ciencias Aranzadi. blancamaria.martinez@ehu.es

La playa de Gorrondatxe, al NE de la desembocadura del río Nervión en el término municipal de Getxo (Fig. 5.1A) es una ensenada abierta al mar, flanqueada por acantilados formados por alternancias de calizas y margas hemipelágicas con intercalaciones de areniscas turbidíticas de edad Eoceno (Payros et al., 2006) y que se continúan hacia el mar a partir de una plataforma de abrasión litoral (Fig. 5.1B). El depósito reciente de esta playa consiste en un prisma sedimentario, con espesores comprendidos entre 3 y 12 m, que se extiende unos 750 m en sentido lateral y con una anchura máxima de 100 m en sentido transversal (Martínez-García et al., 2013).

En el litoral vizcaíno, con una costa predominantemente acantilada, las acumulaciones de depósitos de playa son relativamente escasas (Cruz-Sanjulián et al., 1982) y están condicionadas por las dimensiones y orientación de los entrantes costeros (Pujalte et al., 2015). Esto se debe a que la corriente de deriva litoral, principal transportadora de sedimentos por la plataforma, presenta una orientación de W a E (Cruz-Sanjulián et al., 1982) (Fig. 5.1A), por lo que las grandes acumulaciones de arenas se localizan en las desembocaduras de los estuarios y en las

grandes ensenadas abiertas hacia el NO (Pujalte et al., 2015). Este sedimento es una arena biogénica en la que se mezclan componentes silíceos aportados por los ríos y componentes carbonatados derivados de las conchas y los caparzones de los organismos marinos (Agirrezabala y Flor, 1988). Sin embargo, en pequeñas calas abiertas hacia el N y que queden protegidas por los resaltes rocosos, la influencia del depósito de sedimentos por la corriente de deriva litoral es más bien pequeña, lo que provoca que la escasa acumulación de depósitos arenosos en estas zonas se deba principalmente a la erosión de los acantilados costeros por la acción del oleaje (Pujalte et al., 2015).

Este último caso debería de ser el comportamiento natural de la playa de Gorrondatxe, una ensenada rocosa a la que apenas llegan aportes sedimentarios transportados por la corriente de deriva litoral y donde las escasas acumulaciones arenosas se producen por la erosión de las rocas que conforman el acantilado debida al efecto del oleaje, principalmente en las fases de tormenta. Sin embargo, uno de los aspectos más destacables de esta playa, que además comparte con la vecina playa de Tunnelboca, es

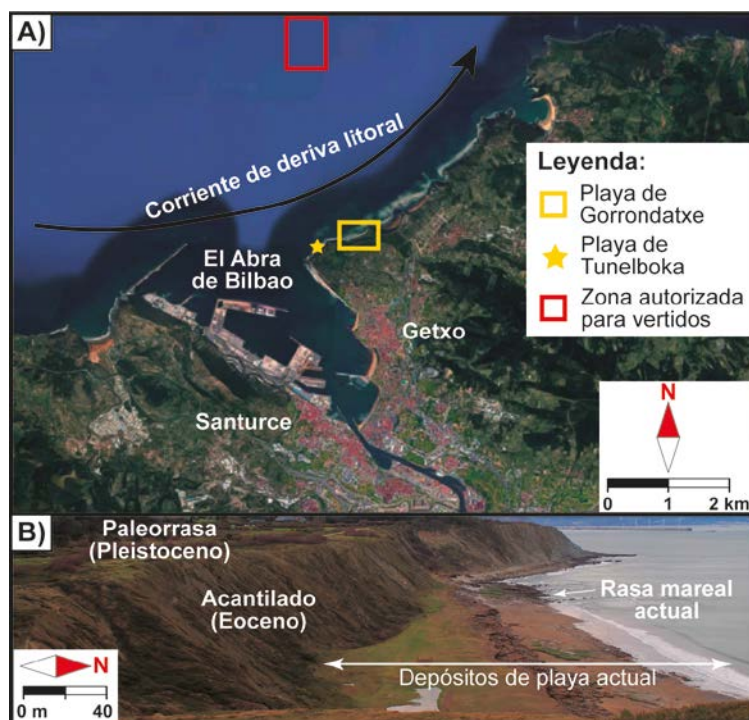


Fig. 5.1. A) Mapa parcial del litoral vizcaíno con la localización geográfica de las playas de Tunnelboca y Gorrondatxe, la zona autorizada para los vertidos industriales y la orientación de la corriente de deriva litoral. B) Aspecto general de la playa de Gorrondatxe donde se detallan sus principales aspectos geomorfológicos (fotografía de I. Guede).

la presencia de depósitos recientes que conforman un “beach rock”, o playa cementada, cuya excepcionalidad radica en que se haya generado en una zona de clima templado (García-Garmilla, 1990; Arrieta et al., 2011; Arrieta, 2014).

Aunque también el origen de los materiales que conforman este depósito es llamativo. Se trata de escorias de fundición, fragmentos de ladrillos refractarios, plásticos, metales, vidrios y otros escombros de origen antrópico vertidos por empresas como Altos Hornos de Vizcaya durante la mayor parte del siglo XX fuera de El Abra de Bilbao (Astibia, 2012). Aunque dichos vertidos tendrían que haberse realizado en una zona específica situada a unos 5 km de distancia mar adentro, en batimetrías comprendidas entre 60 y 80 m de profundidad (Azti Tecnalia, 2006) (Fig. 5.1A), muchos de ellos se produjeron de manera ilegal antes de llegar a esta zona, quedando los materiales antrópicos sometidos a la acción de la corriente de deriva litoral y la acción del oleaje, que los arrastraron hasta su depósito en las ensenadas situadas en el margen oriental de El Abra (Pujalte et al., 2015). Una vez allí, sufrieron una cementación temprana que consolidó rápidamente estos depósitos de origen industrial como depósitos de playa.

En Gorrondatxe, el estudio de sondeos sedimentarios someros (Fig. 5.2) ha permitido observar que el “beach rock” antropogénico se desarrolla sobre unas arenas bioclásticas, con espesores variables de entre 20 cm y 3 m, que se corresponden con los sedimentos de playa original previos a la acumulación de los materiales de origen antrópico (Martínez-García et al., 2013). En cuanto a los depósitos industriales, que alcanzan un máximo de 7 m de espesor, pueden subdividirse en dos

asociaciones de facies principales (Fig. 5.2): a) facies de ambiente intermareal alto a supramareal, formada por arenas de grano medio, con algunas intercalaciones de niveles de cantos, gravas y microconglomerados rellenando pequeños canales discontinuos, parcialmente cementadas, masivas o laminadas y subhorizontales (Fig. 5.3A); y b) facies de ambiente intermareal medio a bajo, compuesta por gravas y conglomerados de cantos decimétricos de escorias de fundición y ladrillos refractarios con una matriz arenosa (Fig. 5.3B), dispuestos en estratos ligeramente inclinados hacia el mar y fuertemente cementados (Martínez-García et al., 2013; Pujalte et al., 2015; Casas Valladolid, 2016). Este sistema corresponde con una playa de grano grueso progradante, del tipo reflectiva-disipativa, generada en unas condiciones abiertas y con un importante hidrodinamismo (Martínez-García et al., 2013; Casas Valladolid, 2016).

Destacan los procesos de cementación carbonatada temprana sufrida por estos depósitos de origen antrópico. Estos cementos están principalmente constituidos por una primera fase de aragonito acicular que está parcialmente cubierta por una segunda fase, mucho menos abundante, de óxidos de hierro (Casas Valladolid, 2016) (Figs. 5.3C-F). La explicación para la generación de estos cementos de tipo “beach rock” se basa en la hipersaturación del catión Mg^{2+} en zonas intermareales con una alta agitación por oleaje (Given y Wilkinson, 1985; Tucker y Wright, 1990), que provoca la desgasificación del CO_2 (Meyers, 1987; Pigott y Trumbly, 1985) dando lugar a una sobresaturación del ión CO_3^{2-} que inhibe la precipitación de calcita y favorece la de aragonito (Ginsburg, 1953; Stoddart y Cann, 1965; Hanor, 1978). Estos cementos de aragonito son más abundantes en la facies de grano más grosero depositada en el intermareal

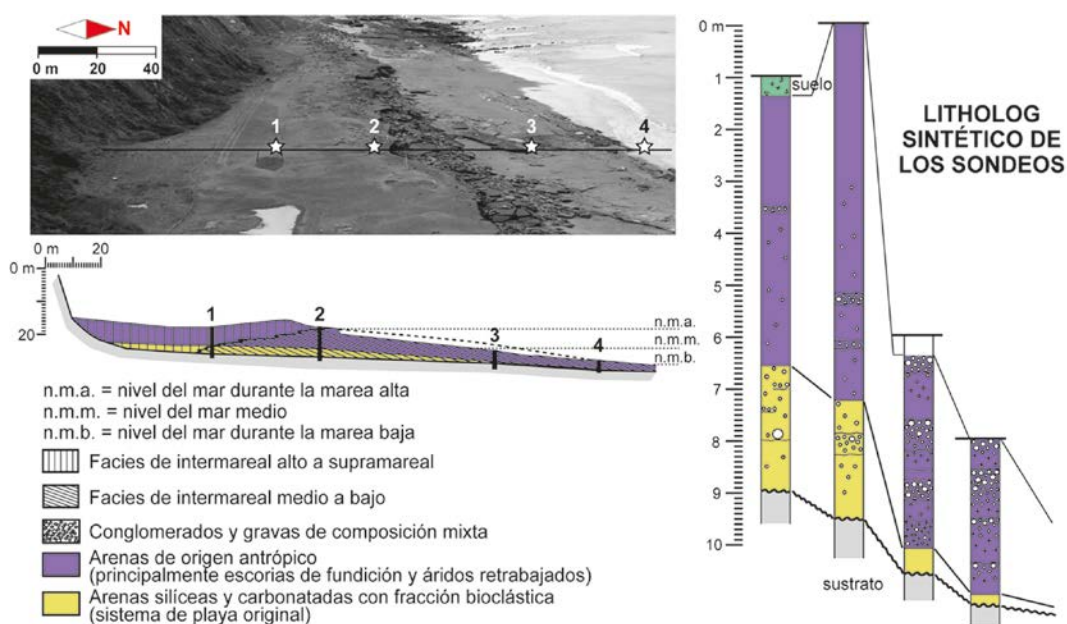


Fig. 5.2. Facies identificadas y correlación sedimentaria de los sondeos sedimentarios someros extraídos en la playa de Gorrondatxe (modificada de Martínez-García et al., 2013).

medio-bajo, lo que indica que se habría precipitado en unas condiciones marino freáticas (Casas Valladolid, 2016). Además, la presencia de bloques de gravas y conglomerados parcialmente cementados y resedimentados por la acción de procesos de tormenta dentro de la acumulación de depósitos antrópicos, indica que esta cementación se produjo de manera muy temprana, prácticamente coetánea con dicha sedimentación (Casas Valladolid, 2016). La segunda generación de cemento de óxidos de hierro se habría producido por una alteración del hierro de los propios depósitos industriales en condiciones freáticas a vadasas (Casas Valladolid, 2016).

En la actualidad, estos depósitos están siendo sometidos a fuertes procesos erosivos, principalmente por la acción del oleaje, por lo que su potencial de preservación es realmente bajo, lo que llegará a provocar su desaparición en las próximas décadas (Pujalte et al., 2015). Sin embargo, hasta la fecha son un valioso

ejemplo didáctico y divulgativo de la influencia antrópica reciente en el medio natural, en este caso de la actividad industrial vizcaína, que caracterizan al Antropoceno. Conceptos tales como tecnosfera, tal y como lo define Haff (2014), y tecnofósiles, en el sentido empleado por Zalasiewicz et al. (2014, 2017), quedan puestos en evidencia con esta playa cementada conformada por escorias de fundición, ladrillos refractarios o plásticos, donde el origen antrópico de estos materiales y la modificación del medio natural provocada por las actividades humanas no dejan lugar a dudas. Actualmente, estos depósitos están catalogados como Lugar de Interés Geológico (LIG 96 Playa cementada Gorrondatxe y Tunelboka) por la Diputación Foral de Bizkaia (1990) y son objeto de salidas didácticas para estudiantes de niveles preuniversitarios y el público en general (Martínez-García et al., 2016), en un intento por concienciar a la población sobre la necesidad de conservar el medio natural y reducir, en la medida de lo posible, nuestro impacto sobre el mismo.

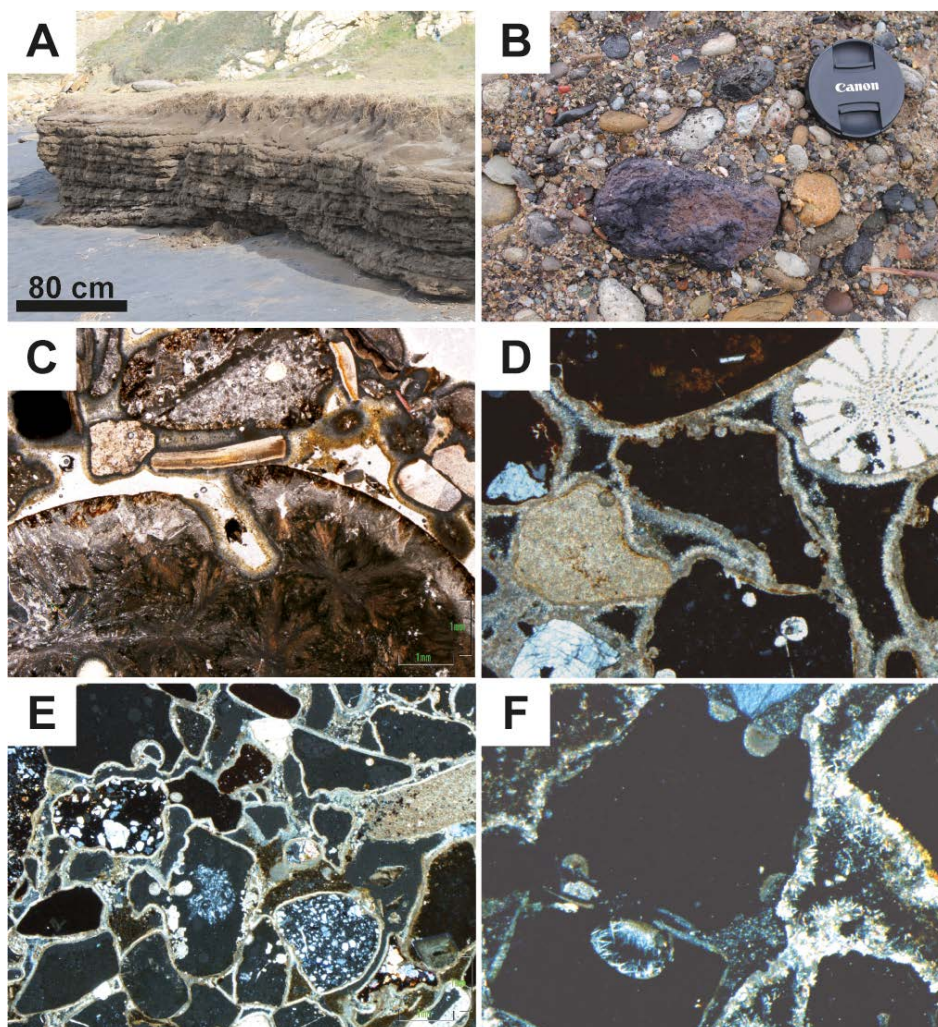


Fig. 5.3. Aspecto en afloramiento de campo de las facies de ambiente intermareal alto a supramareal (A) y de ambiente intermareal medio a bajo (B) e imágenes de microscopio petrográfico (C, D, E y F) de los depósitos del "beach rock" de Gorrondatxe, donde se aprecia el cemento de aragonito acicular parcialmente cubierto por un cemento posterior de óxidos de hierro (fotografías de campo de I. Guede; fotografías de microscopio petrográfico de J.I. Baceta).

Referencias

- Adán de Yarza, R. (1892). Descripción Física y Geológica de la provincia de Vizcaya. Memorias de la Comisión del Mapa Geológico de España, 192 pp.
- Agirrezabala, L.M.; Flor, G. (1988). Distribución de los carbonatos bioclásticos en playas arenosas intermareales del litoral vasco español. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural* 84: 5-18.
- Allen, G.P.; 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.
- Arrieta, N. (2014). The study of an unusual temperate latitude beachrock formation. Characterization of the Azkorri beach and Tunelboka cove locations. Memoria de Tesis Doctoral, UPV/EHU, 406 pp.
- Arrieta, N.; Goienaga, N.; Martínez-Arkarazo, I.; Murelaga, X.; Baceta, J.I.; Sarmiento, A.; Madariaga, J.M. (2011). Beachrock formation in temperate coastlines: Examples in sand-gravel beaches adjacent to the Nerbioi-Ibaizabal Estuary (Bilbao, Bay of Biscay, North of Spain). *Spectrochimica Acta* 80: 55-65.
- Astibia, H. (2012). Tunelboka y Gorrondatxe (Getxo, Bizkaia), fósiles humanos para el Antropoceno. *Euskonews* 640.
- Azti Tecnalia (2006). *Caracterización de la antigua zona de vertidos de "Altos Hornos de Vizcaya" y evaluación del riesgo actual para la biota*. Informe Interno para Dirección de Aguas, 70 pp.
- Buceta, J.L.; Lloret, A.; Antequera, M.; Obispo, R.; Sierra, J.; Martínez-Gil, M. (2015). Nuevo marco para la caracterización y clasificación del material dragado en España. *Ribagua* 2: 105-115.
- Casas Valladolid, B. (2016). Arquitectura deposicional y evolución de la playa de sedimentos antrópicos de Azkorri (Getxo, Bizkaia). *CKQ-Estudios de Cuaternario* 6: 3-12.
- Cearreta, A. (1998a). Transformación ambiental de la Ría de Bilbao. En: Barcena, I. (Coord.), *Bilbo nora zoaz? Reflexiones para un Atlas Medioambiental del Bilbao Metropolitano*, Berekinza, Bilbao: 25-33.
- Cearreta, A. (1998b). Holocene sea-level change in the Bilbao estuary (north Spain): foraminiferal evidence. *Micropaleontology* 44: 265-276.
- Cearreta, A.; Irabien, M.J.; Gómez-Arozamena, J.; Kortabitarte, I.; González-Lanchas, A. (2017). El registro geológico antropoceno en el Abra de Bilbao: evidencias de su historia natural y humana. *Geogaceta* 61: 11-14.
- Cearreta, A.; Irabien, M.J.; Leorri, E.; Yusta, I.; Croudace, I.W.; 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.; Ulibarri, I.; Yusta, I.; Croudace, I.W.; Cundy, A.B. (2002). Environmental transformation of the Bilbao estuary, N. Spain: microfaunal and geochemical proxies in the recent sedimentary record. *Marine Pollution Bulletin* 44: 487-503.
- Cruz-Sanjulián, J.; García-Mondéjar, J.; Pujalte, V. (1982). *Estudio preliminar del condicionamiento geológico y características sedimentarias de las playas de Vizcaya*. Informe interno para la Diputación de Vizcaya, 36 pp.
- Cundy, A.B.; Croudace, I.W.; Cearreta, A.; Irabien, M.J. (2003). Reconstructing historical trends in metal input in heavily-modified, contaminated estuaries: studies from Bilbao, Southampton Water and Sicily. *Applied Geochemistry* 18: 311-325.
- Diputación Foral de Bizkaia (1990). *Puntos de Interés Geológico de Bizkaia*. Departamento de Cultura, Bilbao, 270 pp.
- Eggleton, J.; Thomas, K.V. (2004). A review of factors affecting the release and bioavailability of contaminants during sediment disturbance events. *Environment International* 30: 973-980.
- Fdez-Ortiz de Vallejuelo, S.; Arana, G.; de Diego, A.; Madariaga, J.M. (2010). Risk assessment of trace metals in sediments: the case of the estuary of the Nerbioi-Ibaizabal river (Basque Country). *Journal of Hazardous Materials* 181: 565-573.
- García-Artola, A.; Stéphan, P.; Cearreta, A.; Kopp, R.E.; Khan, N.S.; Horton, B.P. (2018). Holocene sea-level database from the Atlantic coast of Europe. *Quaternary Science Reviews* 196: 177-192.
- 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. (1987). *La formación de una ciudad industrial. El despegue urbano de Bilbao*. Instituto Vasco de la Administración Pública, Bilbao, 844 pp.
- Ginsburg, R.N. (1953). Intertidal erosion on the Florida Keys. *Bulletin of Marine Science Gulf and Caribbean* 3: 55-69.
- Given, R.K.; Wilkinson, B.H. (1985). Kinetic control of morphology, composition, and mineralogy of abiotic sedimentary carbonates. *Journal of Sedimentary Petrology* 55: 109-119.
- González Oreja, J.A.; Saiz Salinas, J.I. (1998). Exploring the relationships between abiotic variables and benthic community structure in a polluted estuarine system. *Water Research* 32: 3799-3807.
- Grifoll, M.; Fontán, A.; Ferre, L.; Mader, J.; González, M.; Espino, M. (2009). 3D hydrodynamic characterization of a meso-tidal estuary: the case of Bilbao (northern Spain). *Coastal Engineering* 55: 907-918.
- Guerrero Pérez, J.; Rodríguez Puente, C.; Jornet Sancho, A. (1988). Estudio de metales pesados en aguas y sedimentos superficiales de las costas gallegas y cantábricas. Informes Técnicos del Instituto Español de Oceanografía, p. 64 (16 p).
- Haff, P.K. (2014). Technology as a geological phenomenon: implications for human well-being. En: Waters, C.N.; Zalasiewicz, J.; Williams, M.; Ellis, M.A.; Snelling, A. (Eds.), *A Stratigraphical Basis for the Anthropocene*. Geological Society of London, Special Publication 395, 301-309.
- Hanor, J.S. (1978). Precipitation of beachrock cements: mixing of marine and meteoric waters vs. CO₂-degassing. *Journal of Sedimentary Petrology* 48: 489-501.
- Hazera, J. (1968). La region de Bilbao et son arrièrepays: Etude géomorphologique. *Munibe* 20: 1-358.
- Instituto Geológico y Minero de España (1986). Estudio geológico para la previsión de riesgos por inundaciones en el País Vasco (Alava y Vizcaya) y condado de Treviño. *Serie Geología Ambiental* 73.
- Irabien, M.J.; Cearreta, A.; Serrano, H.; Villasante-Marcos, V. (2018). Environmental regeneration processes in the Anthropocene: The Bilbao estuary case (northern Spain). *Marine Pollution Bulletin* 135: 977-987.
- Irabien, M.J.; Cearreta, A.; Gómez-Arozamena, J.; Serrano, H.; Sanchez-Cabeza, J.A.; Ruiz-Fernández, A.C. (2019). Geological record of extreme floods and anthropogenic impacts on an industrialised bay: The inner Abra de Bilbao (northern Spain). *Science of the Total Environment* 696: 133946.
- Legorburu, I.; Galparsoro, I.; Larreta, J.; Rodríguez, J.G.; Borja, A. (2013). Spatial distribution of metal

- accumulation areas on the continental shelf of the Basque Country (Bay of Biscay): a GIS-based project. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 134: 162–173.
- Leorri, E.; Cearreta, A. (2004). Holocene environmental development of the Bilbao estuary, northern Spain: sequence stratigraphy and foraminiferal interpretation. *Marine Micropaleontology* 51: 75–94.
- Leorri, E.; Cearreta, A.; Irabien, M.J.; Yusta, I. (2008). Geochemical and microfaunal proxies to assess environmental quality conditions during the recovery process of a heavily polluted estuary: the Bilbao estuary case (N. Spain). *Science of the Total Environment* 396: 12–27.
- Long, E.R.; MacDonald, D.D.; Smith, S.L.; Calder, F.D. (1995). Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. *Environmental Management* 19: 81–97.
- Lugaresaresti Bilbao, J.I. (1994). Aspectos del clima marítimo y morfodinámica en el Puerto exterior de Bilbao (Shoreface morphodynamics in the Abra Bay of Bilbao, Basque Country). *Kobie* 22: 23–32.
- Martínez-García, B.; Mendicoa, J.; Guede, I.; Ordiales, A. (2016). *De Punta Galea a Sopelana buscando el Dorado*. Colección Geología, Sociedad Geológica de España, 8 pp.
- Martínez-García, B.; Pascual, A.; Baceta, J.I.; Murelaga, X. (2013). Estudio de los foraminíferos bentónicos del “beach-rock” de Azkorri (Getxo, Bizkaia). *Geogaceta* 53: 29–32.
- Mestres, M.; Sierra, J.P.; Mösso, C.; Sánchez-Arcilla, A.; Hernández, M. (2014). Numerical assessment of the dispersion of overspilled sediment from a dredge barge and its sensitivity to various parameters. *Marine Pollution Bulletin* 79: 225–235.
- Meyers, J.H. (1987). Marine vadose beachrock cementation by cryptocrystalline magnesian calcite (Maui, Hawaii). *Journal of Sedimentary Petrology* 57: 755–761.
- Payros, A.; Orue-Etxebarria, X.; Pujalte, V. (2006). Covarying sedimentary and biotic fluctuations in Lower-Middle Eocene Pyrenean deep-sea deposits: Palaeoenvironmental implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 234: 258–276.
- Pigott, J.D.; Trumbly, N.I. (1985). Distribution and origin of beachrock cements, Discovery Bay (Jamaica). *Proceedings of the 5th International Coral Reef Symposium*, Vol. 3: 241–247.
- Puertos del Estado (1997). *Atlas Geotécnico del Puerto de Bilbao*. Centro de Publicaciones del Ministerio de Fomento, Madrid, 139 pp.
- Pujalte, V.; Astibia, H.; Aizpiri, F.; Payros, A. (2015). Las playas cementadas del “Antropoceno” de Bizkaia, País Vasco: origen y degradación. *Geogaceta* 57: 123–126.
- Rodríguez-Iruretagoiena, A.; Elejoste, N.; Gredilla, A.; Fdez-Ortiz de Vallejuelo, S.; Arana, G.; Madariaga, J.M.; de Diego, A. (2016). Occurrence and geographical distribution of metals and metalloids in sediments of the Nerbioi-Ibaizabal estuary (Bilbao, Basque Country). *Marine Chemistry* 185: 82–90.
- Sanchez-Cabeza, J.A.; Ruiz-Fernández, A.C. (2012). 210Pb sediment radiochronology: an integrated formulation and classification of dating models. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 82: 183–200.
- Stoddart, D.R.; Cann, J.R. (1965). Nature and origin of beachrock. *Journal of Sedimentary Petrology* 35: 243–273.
- Swindlehurst, R.J.; Johnston, P.A. (1991). Severe heavy metal and PAH contamination in Bilbao, northern Spain. Greenpeace Technical Report (19 p).
- Tucker, M.E.; Wright, V.P. (1990). *Carbonate Sedimentology*. Blackwell Publishing, Oxford, 482 pp.
- Vail, P.R.; Audemard, F.; Bowman, S.A.; Eisner, P.N.; Perez-Cruz, C. (1991). The stratigraphic signatures of tectonics, eustasy, and sedimentation—an overview. En: Einsele, G.; Ricken, W.; Seilacher, A. (Eds.), *Cycles and Events in Stratigraphy*, Springer, Berlin, 617–659.
- Villasante-Marcos, V.; Irabien, M.J.; Cearreta, A. (2019). Propiedades magnéticas de los sedimentos recientes de la Ría de Bilbao: un relato de contaminación industrial y recuperación postindustrial en el Antropoceno. En: Cearreta, A. (Ed.), *Libro de Resúmenes XV Reunión Nacional de Cuaternario*, SC Aranzadi-UPV/EHU-Asociación Española para el Estudio del Cuaternario (AEQUA), Donostia, 214–217.
- Zalasiewicz, J.; Williams, M.; Waters, C.N.; Barnosky, A.D.; Haff, P. (2014). The technofossil record of humans. *The Anthropocene Review* 1: 34–43.
- Zalasiewicz, J.; Williams, M.; Waters, C.; Barnosky, T.; Palmesino, J.; Rönnskog, A.-S.; Edgeworth, M.; Neal, C.; Cearreta, A.; Ellis, E.C.; Grinevald, J.; Haff, P.; Ivar do Sul, J.; Jeandel, C.; Leinfelder, R.; McNeill, J.R.; Odada, E.; Oreskes, N.; Price, S.J.; Revkin, A.; Steffen, W.; Summerhayes, C.; Vidas, D.; Wing, S.; Wolfe, A.P. (2017). Scale and diversity of the physical technosphere: A geological perspective. *The Anthropocene Review* 4: 9–22.

Foto de portada: Desembocadura de la Ría de Bilbao, 1863.



www.ehu.eus/simposiomia2022



ZIENTZIA
ETA TEKNOLOGIA
FAKULTATEA
FACULTAD
DE CIENCIA
Y TECNOLOGÍA

50 URTE
AÑOS
Biba Zientzia!
Ciencia Viva



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea



EUSKO JAURLARITZA
GOBIERNO VASCO

HEZKUNTZA SAILA
DEPARTAMENTO DE EDUCACIÓN



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE CIENCIA
E INNOVACIÓN