

CONTAMINACION EN SEDIMENTOS MARINOS

M. Romana Ruiz*
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

En este artículo se aborda el problema de la contaminación de sedimentos marinos recientes, que resulta clave para la discusión de los efectos ambientales de las operaciones de dragado, y por lo tanto condiciona fuertemente las preceptivas Declaraciones de Impacto Ambiental de las obras portuarias y marítimas.

Se repasan las características de los sedimentos, y su posible contaminación por metales pesados, radionucleidos, compuestos orgánicos, hidrocarburos, pesticidas, etc. Los niveles aceptables de contaminación actualmente más en uso en Europa corresponden a las Normas Holandesas. En la parte final del artículo se discuten los métodos más apropiados de dragado y tratamiento de sedimentos contaminados.

This paper poses the problems of pollution in recent marine sediments, which is the key for the discussion of environmental effects of dredging operations, and the most important condition included in Environmental Impact Declarations for marine and harbour works.

The paper gives some of the properties of sediments and its possible contamination by heavy metals, radionucleids, organic compounds, hydrocarbons, pesticides.. Acceptable levels of pollution following the Dutch Regulations are the practical standard now in Europe. In the final part the paper show the most adequate methods for dredging and for the treatment of polluted sediments.

1. Introducción

La contaminación de los sedimentos marinos recientes ha pasado a ser uno de los problemas medioambientales que más preocupan a la hora de encarar las obras portuarias y es uno de los aspectos más significativos del problema general de la contaminación de los mares. Por razones que se explicarán posteriormente, la contaminación del medio marino tiende a concentrarse mucho más en los sedimentos del fondo que en el caso de la contaminación de las aguas continentales. Esta concentración en los sedimentos tiene implicaciones geotécnicas.

Normalmente los sedimentos recientes son, en su capa superficial, menos compactos y con frecuencia están en fase de consolidación. Por lo tanto ha sido una práctica normal el dragado de dichos sedimentos como primera etapa de la construcción de diques y/o muelles portuarios. Así en Valencia las últimas prolongaciones de diques para ampliación del puerto han requerido dragados hasta 22-24 m de profundidad. Una prolongación del dique de abrigo del Puerto de Barcelona, sin dragado previo de los sedimentos blandos, supuso problemas de estabilidad y asientos del dique, que dieron lugar a retrasos de varios años y exigieron un cambio de perfil transversal del dique, adicionandole bermas horizontales para mejorar su estabilidad. Sin embargo la preocupación por la posible contaminación (y toxicidad) de dichos sedimentos está ocasionando que en las últimas "Declaraciones de Impacto Ambiental" de Obras Portuarias se prohíban (o al

*Universidad Politécnica de Valencia. Ingeotec
Recibido en ROP: septiembre 1994

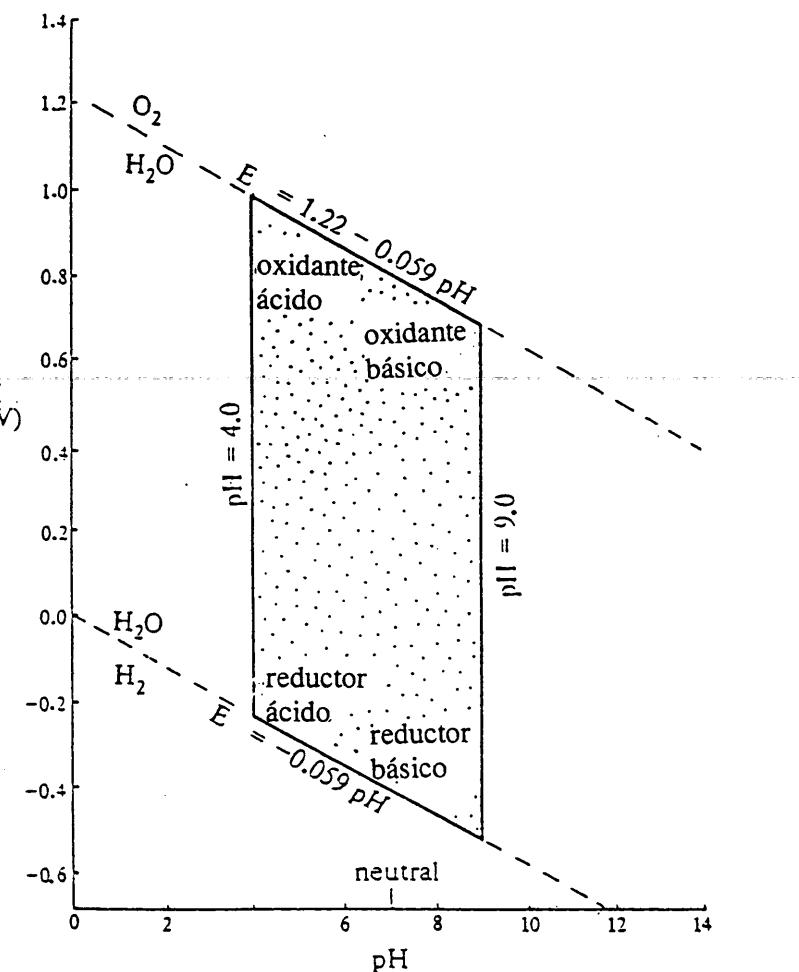


Figura 1. Gráfico del rango normal de valores de E y pH en la tierra (punteado) y límites de estabilidad del agua (Krauskopf, 1979)

menos se limiten seriamente) dichos dragados previos.

En este artículo se encara este problema examinando los procesos de formación de sedimentos, su contaminación y los criterios objetivos para evaluarla y finalmente los métodos de dragado y disposición de los sedimentos con diferentes grados de contaminación.

Holanda es uno de los países líderes en el campo del dragado, y ha desarrollado una clasificación concreta de los sedimentos respecto a su contaminación. Un examen de la experiencia holandesa puede ser de utilidad para nosotros.

2. Algunas características de los sedimentos marinos

Numerosas sustancias que permanecen en suspensión y/o disolución en las aguas continentales precipitan rápidamente al entrar en el mar.

El alto contenido de sales produce una rápida floculación de las arcillas que sedimentan en las desembocaduras de los ríos, dando origen a las formaciones deltáticas, mientras que las arenas permanecen en suspensión y son arrastradas a lo largo de la costa.

Los minerales pesados naturales suelen ser químicamente inertes y se distribuyen a lo largo de la costa en los sedimentos arenosos. Los más abundantes suelen ser los opacos que incluyen ilmenita, magnetita y otros compuestos de hierro. SANJAUME (1985) ha estudiado la concentración de opacos en las costas valencianas. Ha encontrado que dicha concentración crece en Sagunto, y en menor medida en Valencia, lo que podría ser interpretado erróneamente como resultado de las actividades industriales de la Siderurgia de Sagunto y otras industrias en Valencia. Pero en realidad la mayor concentración debe proceder de los ríos que drenan el macizo ibérico en su zona de Teruel, (Turia, Palancia, Ana y Mijares) como lo demuestra el hecho de que el contenido de opacos es también muy alto en la zona de Burriana, próxima a las desembocaduras de los ríos Ana y Mijares, donde la actividad industrial pesada ha sido nula. Es preciso ponerse en guardia contra interpretaciones simplistas basadas en la escasez de datos.

Respecto a los metales pesados su comportamiento depende de dos factores:

- el pH, que refleja el carácter ácido ($4 < \text{pH} < 7$) o básico ($7 < \text{pH} < 9$).
- el potencial de oxidación-reducción, o potencial Redox, que diferencia los ambientes oxidantes ($E > 0$) de los reductores ($E < 0$).

La figura 1 debida a KRAUSKOPF (1979) y tomada de LEEDER (1982), reproduce el rango de variación natural de pH y Eh en la superficie de la tierra. En el agua del mar el pH es superior a 7,5 lo que le confiere carácter básico (e inhibe la disolución de muchas sustancias).

La figura 2 debida a HORNE (1969), y tomada también de LEEDER (1982), muestra esquemáticamente la concentración de oxígeno en el agua oceánica. Cerca de la superficie el agua está prácticamente saturada pero el contenido de oxígeno decrece con la profundidad, debido a procesos de oxidación de la materia orgánica, sobre to-

TABLA 1. ZONAS DIAGENETICAS EN SEDIMENTOS MARINOS (CURTIS, 1977)

Prof. (m)	Porosidad (%)	Zona	Proceso Predominante	Minerales formados
< 0,5		1	Oxidación	
0,5-10	> 80	2	Reducción de sulfatos	Pirita, calcita, dolomita
10-1000	31-80	3	Fermentación	Carbonatos férricos, siderita
1000-2500	21-31	4	Descarboxidación	Siderita
2500-7000	9-21	5	Formación de hidrocarburos	Petroleo, gas, metano
> 7000	< 9	6	Metamorfismo	

do en zonas de baja agitación. Por lo tanto abundarán las aguas anóxicas (de poco oxígeno) en las zonas portuarias y cerca de las desembocaduras de los ríos que drenan las cuencas agrícolas. El efecto será más acusado en mares de aguas más tranquilas y sin mareas, como el Mediterráneo.

CURTIS (1977), (citado en LEEDER, 1982) ha postulado un modelo general para los sedimentos marinos, clasificándolos en diversas zonas diagénéticas que se resumen en la tabla 1.

En la zona 1, más superficial, se incluyen los sedimentos recién depositados, de gran porosidad y alto contenido en materia orgánica, que se oxida, con formación de CO₂.

En la zona 2, de más interés para la ingeniería, se produce una reducción bacteriana de los sulfatos. El proceso genera gases (CO₂, NH₃, Metano) que suelen permanecer in situ y burbujean al manipular y/o dragar los sedimentos. Los sulfatos son reducidos a sulfuros con producción de gas sulfídrico, formación de pirita, reducción de los iones férricos a ferrosos y abundancia de crecaciones de calcita, que a veces cementan los sedimentos arenosos formando auténticas areniscas.

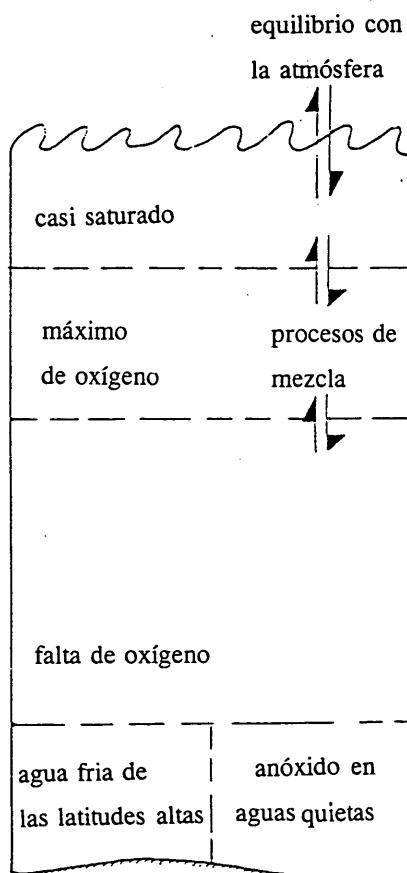


Figura 2. Esquema de la variación de la concentración de oxígeno con la profundidad en el agua oceánica (Horne, 1979)

GREENPEACE ha denunciado la existencia de una "contaminación significativa de cadmio entre Cartagena y Valencia y en los vertidos de los ríos Po y Ródano" lo que podría confirmar su origen agrícola

En la zona 3, más profunda, ya no quedan sulfatos y no precipitan carbonatos ni pirita. Predominan procesos de fermentación orgánica con producción de metano y dióxido de carbono. Precipitan los carbonatos pesados que se combinan con los iones ferrosos para producir fases minerales tales como calcita y/o dolomita ferrosa, ankerita y siderita.

Las zonas 4, 5, 6 son asiento de procesos geológicos de gran importancia pero no son sedimentos recientes.

3. Contaminación por metales pesados

De la descripción anterior se deduce que abundan en los sedimentos marinos los compuestos de hierro (pirita, siderita, chamosita, glauconita...). No son considerados contaminantes en ningún país.

El manganeso puede aparecer en forma de nódulos en la superficie del fondo marino. El manganeso procede de la erosión en superficie terrestre (arrastrado por los ríos) y también de flujos volcánicos submarinos. En los sedimentos el manganeso es insoluble pero en aguas profundas con poco oxígeno pueden producirse procesos de reducción que lo transforman en soluble para volver a oxidarlo y precipitar en aguas someras. El manganeso, que parece va a tener un gran interés minero, no es considerado contaminante en ningún país.

El arsénico y el cadmio están asociados al uso de pesticidas agrícolas y de fertilizantes fosfatados (sobre todo en los cultivos por regadío), aunque también pueden proceder de vertidos industriales de diverso origen (refino de cinc, industria galvánica, fabricación de baterías, fabricación de plásticos, producción de fertilizantes ...).

El cadmio es el contaminante más peligroso, después del mercurio. Se encuentra ligado a los sedimentos por procesos de adsorción, que aumenta con el pH. Hay correlación entre el contenido de cadmio y el de materia orgánica. En el hombre el cadmio ataca los riñones.

GREENPEACE (1991) ha denunciado la existencia de una "contaminación significativa de

cadmio entre Cartagena y Valencia y en los vertidos de los ríos Po y Ródano" lo que podría confirmar su origen agrícola.

El mercurio es el contaminante más peligroso. HERNANDEZ SOBRINO (1992) señala que el contenido medio de mercurio en los meteoritos es 100 veces superior al de la corteza terrestre de lo que parece inferirse su origen magmático, emanando hacia la superficie de la tierra como un producto de desgasificación a través de fallas profundas. La circulación del mercurio en el medio ambiente sería natural "calculándose que los océanos contienen 200 millones de toneladas (de mercurio)... 250 veces más cantidad que todo el mercurio producido por el hombre a lo largo de la Historia". Pero además el mercurio es imprescindible para la producción de materiales básicos de la industria química, como el cloro o la sosa caustica, se emplea en aparatos de medida y control y como fungicida.

En todo caso los vertidos humanos de mercurio han producido catástrofes como la muerte de más de 40 pescadores japoneses en Minamata y Niigata (Japón) a causa de la ingestión de pescado contaminado por metilmercurio, vertido por industrias próximas. Este episodio, y otros similares, han creado una gran prevención de la opinión pública contra el mercurio como contaminante, cuyo efecto, en el cuerpo humano, es un ataque al sistema nervioso central.

La Organización Mundial de la Salud ha fijado el límite, en productos para consumo humano, de 1 ppm de Hg, límite que ha sido después adoptado legalmente en España. GREENPEACE (1991) ha denunciado la existencia de altas concentraciones de mercurio en los cadáveres de delfines muertos en el Mar Mediterráneo (hasta 100 ppm en el cerebro y 800 ppm en el hígado) en la epidemia de 1990. Estas altas concentraciones habrían sido la causa directa o indirecta de la mortandad. El bacalao pescado en las proximidades del Mar del Norte contiene 1,3 ppm de Hg, treinta veces más que el bacalao de la costa de Groenlandia (GREENPACE, 1990).

SIERRA (1993) presenta un buen resumen de los conocimientos actuales sobre las condiciones de aparición de mono y dimetilmercurio. Se trata de un proceso bacteriano que puede producirse en condiciones tanto aerobias como anaerobias. El mercurio es sin embargo retenido en los sedi-

TABLA 2. CONCENTRACION DE METALES PESADOS EN DIVERSOS SEDIMENTOS (p.p.m.)

Zona	Cd	Hg	Pb	Cu	Zn	Referencias
Cuenca del Besos	s.d.	s.d.	1780/1580	38/77	s.d.	RAURET et al (1988)
Cuenca del Llobregat	01/10	s.d.	10/234	10/177	35/873	CASAS et al (1990)
Ria de Bilbao	9	s.d.	1154	362	1217	SEEBOLD et al (1982)
Ria de Huelva	14	65	3550	3870	5580	TOMAS et al (1983)
Ria de Huelva	s.d.	11,5	1183	3541	2654	SIERRA (1993)
Puerto de Valencia	s.d.	<10	79,5	20,8	s.d.	INGEOTEC (1991)
Puerto de Valencia	37,6	s.d.	106	43,1	s.d.	AYUNTAMIENTO (1991)

Notas: 1 p.p.m. una parte por millón (en peso seco)

s.d. sin datos

mentos en condiciones reductores y en presencia de materia orgánica no oxidada.

■ Cobre

El cobre en el medio ambiente tiene un origen natural, muy acentuado en la minería. Se produce vertido de cobre en diversas industrias, tales como la fabricación de germicidas y fungicidas, la fabricación de pinturas y pigmentos, la industria del automóvil y la cerámica. Puede tener efectos tóxicos sobre el hombre. Es fácilmente adsorbido por los sedimentos.

■ Plomo

El plomo presenta un ciclo complejo, con una concentración anormalmente alta en la atmósfera a causa de la combustión de la gasolina, efecto que disminuirá en el futuro. Los vertidos más peligrosos proceden de la industria pesada y de la fabricación de baterías e industria del automóvil. El plomo es peligroso para los niños y puede ocasionar trastornos mentales y del comportamiento en muchos animales.

■ Cromo

El cromo, que presenta efectos tóxicos en algunas de sus formas oxidadas (pero no en las reducidas) procede de vertidos de la industria de pigmentos, curtidos y de los procesos de galvanizado. En los sedimentos aparecen en su forma reducida, poco soluble.

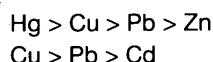
■ Cinc

El cinc es poco tóxico y procede sobre todo de procesos de galvanización y, en menor medida en la industria textil y de colorantes. En los sedimentos está asociado por adsorción a los óxidos de hierro y manganeso.

■ Estaño

El estaño es, en ciertos compuestos, muy tóxico para algas y animales y por eso se utiliza en la producción de pinturas para embarcaciones y muelles.

En resumen los metales pesados no son solubles en el ambiente reductor de los sedimentos y se adsorben fácilmente a ellos. Se han descrito diversos órdenes de magnitud de la fuerza de adsorción, órdenes que pueden ser indicativos del riesgo de remoción de los metales adsorbidos. Así SIERRA (1993) cita



y CASAS et al (1990) citan



resalta la relativa estabilidad del mercurio y la relativa inestabilidad del cadmio.

La posible contaminación de sedimentos por materiales radioactivos empieza a inquietar

La concentración de metales pesados no es la misma en todas las fracciones de un mismo sedimento sino que parece ser mayor en las partículas de granulometría fina que en las de granulometría gruesa.

Según GREENPACE (1990) hay una gran concentración de metales pesados en los sedimentos de los estuarios de ríos con curso en países industriales (como el Rin, el Escalda, el Weser, el Elba o el Támesis).

Estas concentraciones se deben por una parte a décadas de vertidos incontrolados y por otra parte al cambio de pH del agua en la interfaz con el mar. Los metales están adsorbidos en la superficie de los sedimentos de granulometría fina (arcillas, fangos) y vuelven a removese con los constantes dragados necesarios para mantener navegables las grandes vías fluviales.

En la tabla 2 se recogen algunos datos sobre concentración de metales pesados en diversos sedimentos en España. Debe notarse que los dos primeros casos se refieren a aguas dulces y las tres siguientes corresponden a ambientes de salinidad reducida, que puede ser inferior a la del mar. Pueden compararse estas cifras con las de las Normas Holandesas que se citarán más adelante

4. Contaminación por Radionucleidos

La posible contaminación de sedimentos por materiales radioactivos empieza a inquietar. Tras el accidente de la C.N. de Chernobyl se estudiaron las concentraciones de este tipo de material en diversos lagos (Leman, Ontario, Greifensee) y mares (Bering, Atlántico Norte, Bahía de Sagami.). Se comprobó que la mayoría de dichos materiales se adsorbió rápidamente mediante procesos similares a los descritos anteriormente. Los sedimentos actuaron como "trampa" especialmente para el uranio, que se moviliza sólo en condiciones de acidez.

BENSON y DAVIS (1989) presentaron un resumen de referencias sobre el tema. La concentración de uranio en el agua intersticial de sedimentos marinos del Atlántico Norte osciló entre 0.05×10^{-3} y 0.5×10^{-3} p.p.m.

SAMPER (1993) ha resumido algunos de los datos obtenidos en estudios de la movilización de uranio a partir de la escombrera de la F.U.A.. Algunas cifras interesantes sobre concentraciones en agua dulce subterránea son las siguientes:

- Concentración normal en agua subterránea < 0,01 ppm
- Concentración normal en agua subterránea cerca de masas naturales de uranio 0,4/0,5 ppm
- Concentración máxima tolerable para el C.S.N. 0,25 ppm

Los estudios han revelado concentraciones máximas bajo la escombrera de 1 ppm que se reducen a menos de 0,1 ppm a dos kilómetros de distancia. No hay concentraciones apreciables en el agua del río Guadalquivir, inmediato a la zona. Está en marcha una acción de ENRESA para la protección y sellado de la escombrera.

5. Contaminación por Compuestos Orgánicos

5.1. Nutrientes

SIERRA (1993) señala que las formas solubles de nitrógeno y fósforo no son tóxicas para el hombre pero al ser fácilmente asimilables por las algas dan origen a la eutrofización de las aguas por crecimiento excesivo del fitoplancton ocasionándose las "mareas rojas" que hacen muy desagradable el contacto con el agua, aunque no sean propiamente tóxicas.

El fósforo se encuentra en forma de fosfatos y su exceso procede en primer lugar de aguas negras que no hayan sufrido una depuración terciaria de vertidos agrícolas con alto contenido de abonos y de ganadería. En los sedimentos con ambiente reductor el fósforo queda atrapado pero puede liberarse al dragar.

El nitrógeno tiene el mismo origen pero procede además de la alta concentración de óxidos nitratos atmosféricos producidos por los motores de construcción y por las centrales térmicas de carbón.

Aún sin dragados los excesos de nutrientes vertidos en aguas poco depuradas han producido frecuentes molestias en las playas levantinas du-

TABLA 3. LIMITES DE TOXICIDAD EN LIXIVIADOS (EPA, 1992)

rante los últimos años. La construcción de depuradoras y emisarios mitigará este efecto pero pueden quedar sedimentos contaminados durante largo tiempo.

La cuantificación de la contaminación orgánica debe incluir la medida del carbono orgánico total y de la materia volátil.

5.2. Hidrocarburos

Se encuentran en este grupo sustancias muy diversas tales como:

- petroleos y derivados
- hidrocarburos aromáticos policíclicos
- hidrocarburos clorados (o clorinados)
- hidrocarburos halogenados

Los hidrocarburos naturales, derivados del petróleo, son compuestos orgánicos del ciclo del carbono que se descomponen con relativa facilidad (en plazos de varios años) y el carbono vuelve a la atmósfera y a su ciclo natural. Su contaminación procede de fugas y vertidos, a veces en cantidades muy importantes, que son siempre bastante evidentes.

Los hidrocarburos halogenados (HCH) se empezaron a fabricar hace 50 años y son compuestos artificiales en los que átomos de hidrógeno se sustituyen por átomos de cloro, fluor o bromo. Son productos muy estables y se utilizan en una gran variedad de aplicaciones:

- plásticos (PVC)
- disolventes y aerosoles (CFC)
- grasas y fluidos (PCB)
- pesticidas (DDT, lindano, toxafeno)

No son biodegradables y su ciclo es de décadas. Liegan al mar por vías muy variadas (lluvia, ríos, vertidos directos...) y muchos de ellos son fuertemente tóxicos. En general se encuentran en concentraciones muy reducidas y fuertemente asociados a los sedimentos, por lo que es difícil su liberación en operaciones de dragado (SERRA, 1993).

METAL	CONCENTRACION (ppm)
Arsénico	5,0
Bario	100,0
Cadmio	1,0
Cromo	5,0
Mercurio	0,2
Plata	5,0
Plomo	5,0
Selenio	1,0

6. Niveles tolerables de contaminación

El contacto humano directo con los sedimentos marinos contaminados no es normal. Los problemas de toxicidad se derivarían por lo tanto de forma indirecta, a través del pescado consumido o de los posibles contaminantes en suspensión.

Para el pescado (y otros productos de la acuicultura) el Ministerio de Sanidad y Consumo publicó una O.M. de 2 de Agosto de 1991 (BOE 15 de Agosto de 1991). Tiene interés porque no sólo se establecen los límites legales de contenido en metales pesados sino que además se dispone sobre los métodos de análisis de metales pesados (Plomo, Cobre, Cadmio, Mercurio y Estaño) que son, desde entonces, legales en España. Pero utilizar esta disposición para el estudio de sedimentos carece de sentido ya que la cadena trófica puede ser más o menos compleja y no existe una relación proporcional entre los niveles de contaminación de los sedimentos y los de los seres vivos.

La agencia Norteamericana EPA encargada del Medio Ambiente fijó en 1992 un "límite de toxicidad" para lixiviados contenido en metales pesados, límites que se recogen en la Tabla 3.

TABLA 4. CLASIFICACION HOLANDESA DE SEDIMENTOS SEGUN SU CONTAMINACION

CLASE	DENOMINACION	ACCION A TOMAR
I	No contaminado	Ninguna
II	Ligeramente contaminado	Control
III	Moderadamente contaminado	Uso selectivo
IV	Muy contaminado	Tratamiento

Para los sedimentos en Holanda se aplica la siguiente clasificación de la Tabla 4.

La tabla 5 reproduce la clasificación holandesa (tomada de GIBERT y TO, 1991) incluyendo los tres valores límite citados.

En la práctica las clases II y III se tratan casi de la misma manera. Respecto a la clase IV se considera que con las reglas actuales de respeto al medio ambiente ya no se van a producir nuevos sedimentos tan contaminados y por lo tanto los existentes constituyen un problema singular que irá desapareciendo con el tiempo.

Sin embargo la autoridad competente holandesa (el RIJKSWATERSTAAT) cree que los actuales estándares de calidad ambiental deben ser mejorados y ha propuesto una nueva clasificación general, como "objetivo" para el año 2000, mucho más estricta que la actual.

7. Métodos de dragado y tratamiento de sedimentos contaminados

La secuencia general más correcta de realización de un dragado ha sido bien resumida por ENRIQUEZ AGOS Y BERENGUER (1987).

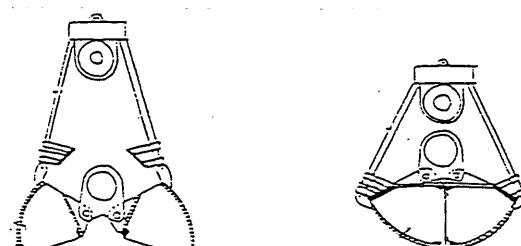
Deben vigilarse y controlarse todas las operaciones y fases del dragado y principalmente:

- elegir los equipos de dragado más adecuados. Así, el de succión es el más favorable si la turbidez no es relevante; los mecánicos pueden amortiguar el ruido mediante medidas de mantenimiento; los de corte deberán evitar un desagregamiento excesivo;

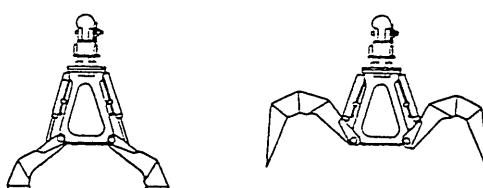
- evitar la contaminación en el proceso de transporte mediante un cierre estanco de compuertas y reducir los derrames por borda mediante un llenado cuidadoso de cántaras;

- evitar el rebote indeseado de productos nocivos tanto en las dársenas como en el entorno.

- elegir las áreas adecuadas para vertido de productos, de forma que en el mar no sean arrastrados o contaminen fondos ricos en biomasa, y en tierra den lugar a terreno apto (agrícola, cimentable) según la naturaleza del producto dragado.



CUCHARA CERRADA



CUCHARA ABIERTA

Figura 3. Diferencia entre cuchillas cerradas y abiertas. Se recomienda dragar con cuchillas cerradas en sedimentos con riesgo de contaminación.

En general convendrá verter en primer lugar los sedimentos más contaminados, recubriendolos posteriormente con los menos contaminados.

En la figura 3 se comparan esquemáticamente una cuchara cerrada (recomendada para el dragado de sedimentos contaminados) con otra abierta. Puede observarse que la cuchara cerrada es muy similar a las que se emplean para excavar con ayuda de lodos bentónicos. El caso donde se recogen los sedimentos está totalmente tapado y dispone de un cierre de goma para mejorar su hermeticidad.

Durante la operación de extracción y vertido se producen efectos contradictorios:

- el pH alto del agua de mar favorece la floculación de todos los sedimentos.

- el aumento de oxidación ($E > 0$) puede facilitar la dispersión y disolución de algunos metales pesados.

- en las mismas condiciones pueden formarse pequeños nódulos de manganeso y hierro que tenderán a impedir la dispersión y disolución de los metales pesados, aglutinándolos; por lo tanto el dragado puede suponer la liberación de metales pesados o por el contrario su captura.

En conjunto parece que la contaminación durante el dragado es reducida y sólo se moviliza una parte muy reducida de los elementos contaminantes presentes en los sedimentos. Así se ha comprobado en Holanda (GIBERT y TO, 1991) y en Huelva (SIERRA, 1993).

El dragado puede verse dificultado por la existencia de gas en proporciones superiores al 5-10% en volumen. Existen en el mercado diversos procedimientos de desgasificación previa de los sedimentos, procesos que están hoy por hoy parcialmente sujetos al secreto industrial.

Para la deposición de los sedimentos de clase II y III (ligera y/o moderadamente contaminados)

TABLA 5. VALORES-LIMITE DE LA CLASIFICACION HOLANDESA DE SEDIMENTOS SEGUN SU CONTAMINACION

Percentage	unity	warning value	assessment value	basic quality
chromium	mg/kg	600	155	100
nickel	mg/kg	100	45	35
copper	mg/kg	400	50	36
zink	mg/kg	2500	1000	140
cadmium	mg/kg	30	7.5	0.8
mercury	mg/kg	15	1.5	0.3
lead	mg/kg	700	160	85
arsenic	mg/kg	100	45	29
oil	mg/kg	5000	3000	500
EOX	mg/kg	20	7	5.5
PAC's				
fluoranthene	mg/kg	7000	2000	1200
Benz(b)fluoranthene	mg/kg	3000	750	550
Benz(k)fluoranthene	mg/kg	3000	750	550
Benz(a)pyrene	mg/kg	3000	750	220
Benz(g,h)perylene	mg/kg	3000	750	200
Indeno (1,2,3,c,d)				
pyrene	mg/kg	3000	750	200
6 PAC's Benzo(a)	mg/kg	17000	4000	2300
Various indiv. PAC's	mg/kg	3000	750	200
Various diterpine				
hydrocarbons	mg/kg	500	15	2.5
Various Cl HC's	mg/kg	2500	100	20
Various PCS's	mg/kg	100	30	4
6 PCS's	mg/kg	400	150	20

CLASS I - SATISFIES THE BASIC QUALITY

CLASS II - EXCEEDS THE BASIC QUALITY BUT SATISFIES THE ASSESSMENT VALUE

CLASS III - EXCEEDS THE ASSESSMENT VALUE BUT SATISFIES THE WARNING VALUE

CLASS IV - EXCEEDS THE WARNING VALUE

se ha establecido un área especial de vertido en Holanda, (llamada el Slufter). Los procedimientos han sido descritos por VAN ZETTEN (1987).

Los sedimentos se dragan por succión y se vierten a un recinto de 50 m de altura con la base a la cota -28, que está rodeado por un dique con la coronación a la cota +24. El volumen total a dragar será de 150.000.000 m³ en 15 años, que después de su consolidación se reducirá a 90.000.000 m³. La solera del recinto no está aislada pero los diques laterales tienen un revestimiento arcilloso sobre los paramentos interiores.

La época de ejecución del dragado no es indiferente. En general será mejor dragar en invierno y primavera que en verano o en otoño porque así se pueden producir menores perjuicios a la biomasa

El material dragado se descarga por bombeo al centro del recinto con velocidades de transporte por la tubería de 2 m/s y de vertido de 0,5 m/s.

Los materiales muy contaminados (clase IV) se almacenan en tierra en un pequeño recinto de 40 ha de base y 1.500.000 m³ de capacidad, cerrado con un dique de 3 m de altura. Los paramentos interiores de los diques y la solera del recinto han sido cubiertos con una membrana de polietileno de alta densidad (HDPE) de 2 mm de espesor, que es prácticamente impermeable, con drenes de control.

El material es dragado y manipulado con cucharas cerradas y dentro del recinto se bombea, previa adición de agua, depositándolo en capas de 1,5 m de espesor. Si los materiales de clase II(y/o III) se vierten en mar abierto se recomienda su cubrición con capas de arcilla, proceso cuya descripción detallada puede verse en SHIELDS y MONTGOMERY (1984).

Por otra parte se dispone ya de tecnología para el tratamiento por hidrociclones de sedimentos muy contaminados (clase IV). Los ensayos de laboratorio parecen demostrar que es posible una reducción de 80 al 95% de los contaminantes (BENDOW y DAVIS, 1989) pero el proceso de tratamiento aún no es industrial.

Finalmente la época de ejecución del dragado no es indiferente. En general será mejor dragar en invierno y primavera que en verano o en otoño porque así se pueden producir menores perjuicios a la biomasa.

Referencias

- CASAS JM, RUBIO R y RAURET G** (1990) "Estudio de sedimentos del río Cardener. Contaminación por metales pesados" Rev. Tecnología del Agua N° 74. Ed. Prensa XXI Barcelona Pp 17-24.
- BENDOW T.J. y DAVIS W.S.** (1989) "Aquatic sediments" Journ. WPCF. Vol. 61 N° 6. Pp 1054-1068.
- ENRIQUEZ AGOS F y BERENGUER PEREZ J.M.** (1987) "Evaluación metodológica del impacto ambiental de un puerto deportivo" Ed. CEDEX. Col. monografías M13. Madrid P 31.

GIBERT S.T. y TO P.W.T. (1991) "Review of dredging practice in the Netherlands" Geo Report n° 17. Ed. Geot. Eng. Office. Hong Kong. 119 pp.

GREENPEACE (1990) "The North Sea" Ed. Collins and Brown. Londres (Editor L. RILEY, textos M. MACGARVIN).

GREENPEACE (1991) "The Mediterranean" Ed. Collins and Brown. Londres (Editor L. RILEY adaptación para España X. PASTOR).

HERNANDEZ SOBRINO A.M. (1993) "El mercurio y el medio ambiente". Rev. INGEOPRES. Madrid Pp 42-45

HORNE R.A. (1969) "Marine Chemistry" Ed. Wiley Nueva York (citado en LEEDER, 1982)

INGEOTEC (1991) "Informe sobre el riesgo de impacto ambiental y nivel de contaminación existentes en la futura Dársena Sur del Puerto de Valencia". No publicado

KRAUSKOPF K.B. (1979) "Introduction to geochemistry" Ed. Mc Graw-Hill. Nueva York (citado en LEEDER, 1982)

LEEDER M.R. (1982) "Sedimentology. Process and product" Ed. Allen and Unwin. Londres. 344 pp.

RAURET G, RUBIO R, LOPEZ-SANCHEZ J.F. y CASASAS E. (1988) "Determination and speciation of copper and lead in sediments of a mediterranean river (Tenes river. Catalonia. Spain). Rev Water Res N° 22. Pp 449-455.

ROMANA M. (1993) "Contaminación en sedimentos marinos recientes". Curso de Geotecnia ambiental. CEDEX. 2º Tomo.

SAMPER CALVETE (1993) "Ejemplo de aplicación de la Metodología de Modelación". Proyecto de Investigación. Universidad de La Coruña. No publicado.

SANJAUME E. (1985) "Las costas valencianas". Tesis doctoral. Facultad de Geografía. Universidad de Valencia.

SEEBOULD I, LABARTA C y AMIGO J.M. (1982) "Heavy metals in the sediments of the Bilbao estuary". Ed. Pergamon Ser. Env. Ser Pp 459-463.

SIERRA ANTIÑOLO J. (1993) "Influencia de las obras de dragado sobre el medio marino" Rev. Ingeniería Civil N° 86. Ed. CEDEX. Madrid. Pp 148-158.

SHIELDS F.D. y MONTGOMERY R.L. (1984) "Fundamentals of capping contaminated material". Proc. ASCE Conf. on Dredging and Dredged. Material Disposal" Vol. 1. PP 446-460.

TOMAS X, OBIOLS J y PEIRO L. (1983) "La contaminación por metales pesados en sedimentos de la ría de Huelva. Análisis de resultados". Rev. Afinidad, tomo KL Pp 413-420.

VAN ZETTEN M. (1987) "Slufterdam disposal solution to Rotterdam's contaminated dredged material problem" Rev Dredging and Port Construction. March Pp 31-35. ■