

IAEA-TECDOC-1953

# Guía Para el Uso de Sedimentos en la Reconstrucción Histórica de la Contaminación en Zonas Costeras



**IAEA**

Organismo Internacional de Energía Atómica

GUÍA PARA EL USO DE SEDIMENTOS  
EN LA RECONSTRUCCIÓN HISTÓRICA  
DE LA CONTAMINACIÓN  
EN ZONAS COSTERAS

Los siguientes Estados son Miembros del Organismo Internacional de Energía Atómica:

AFGANISTÁN	FILIPINAS	PAKISTÁN
ALBANIA	FINLANDIA	PALAU
ALEMANIA	FRANCIA	PANAMÁ
ANGOLA	GABÓN	PAPUA NUEVA GUINEA
ANTIGUA Y BARBUDA	GEORGIA	PARAGUAY
ARABIA SAUDITA	GHANA	PERÚ
ARGELIA	GRANADA	POLONIA
ARGENTINA	GRECIA	PORTUGAL
ARMENIA	GUATEMALA	QATAR
AUSTRALIA	GUYANA	REINO UNIDO DE
AUSTRIA	HAITÍ	GRAN BRETAÑA E
AZERBAIYÁN	HONDURAS	IRLANDA DEL NORTE
BAHAMAS	HUNGRÍA	REPÚBLICA ÁRABE SIRIA
BAHREIN	INDIA	REPÚBLICA
BANGLADESH	INDONESIA	CENTROAFRICANA
BARBADOS	IRÁN, REPÚBLICA	REPÚBLICA CHECA
BELARÚS	ISLÁMICA DEL	REPÚBLICA DE MOLDOVA
BÉLGICA	IRAQ	REPÚBLICA DEMOCRÁTICA
BELICE	IRLANDA	DEL CONGO
BENIN	ISLANDIA	REPÚBLICA DEMOCRÁTICA
BOLIVIA, ESTADO	ISLAS MARSHALL	POPULAR LAO
PLURINACIONAL DE	ISRAEL	REPÚBLICA DOMINICANA
BOSNIA Y HERZEGOVINA	ITALIA	REPÚBLICA UNIDA
BOTSWANA	JAMAICA	DE TANZANÍA
BRASIL	JAPÓN	RUMANIA
BRUNEI DARUSSALAM	JORDANIA	RWANDA
BULGARIA	KAZAJSTÁN	SAMOA
BURKINA FASO	KENYA	SAN MARINO
BURUNDI	KIRGUISTÁN	SAN VICENTE Y
CAMBOYA	KUWAIT	LAS GRANADINAS
CAMERÚN	LESOTHO	SANTA LUCÍA
CANADÁ	LETONIA	SANTA SEDE
COLOMBIA	LÍBANO	SENEGAL
COMORAS	LIBERIA	SERBIA
CONGO	LIBIA	SEYCHELLES
COREA, REPÚBLICA DE	LIECHTENSTEIN	SIERRA LEONA
COSTA RICA	LITUANIA	SINGAPUR
CÔTE D'IVOIRE	LUXEMBURGO	SRI LANKA
CROACIA	MACEDONIA DEL NORTE	SUDÁFRICA
CUBA	MADAGASCAR	SUDÁN
CHAD	MALASIA	SUECIA
CHILE	MALAWI	SUIZA
CHINA	MALÍ	TAILANDIA
CHIPRE	MALTA	TAYIKISTÁN
DINAMARCA	MARRUECOS	TOGO
DJIBOUTI	MAURICIO	TRINIDAD Y TABAGO
DOMINICA	MAURITANIA	TÚNEZ
ECUADOR	MÉXICO	TURKMENISTÁN
EGIPTO	MÓNACO	TURQUÍA
EL SALVADOR	MONGOLIA	UCRANIA
EMIRATOS ÁRABES UNIDOS	MONTENEGRO	UGANDA
ERITREA	MOZAMBIQUE	URUGUAY
ESLOVAQUIA	MYANMAR	UZBEKISTÁN
ESLOVENIA	NAMIBIA	VANUATU
ESPAÑA	NEPAL	VENEZUELA, REPÚBLICA
ESTADOS UNIDOS	NICARAGUA	BOLIVARIANA DE
DE AMÉRICA	NÍGER	VIET NAM
ESTONIA	NIGERIA	YEMEN
ESWATINI	NORUEGA	ZAMBIA
ETIOPÍA	NUEVA ZELANDIA	ZIMBABWE
FEDERACIÓN DE RUSIA	OMÁN	
FIJI	PAÍSES BAJOS	

El Estatuto del Organismo fue aprobado el 23 de octubre de 1956 en la Conferencia sobre el Estatuto del OIEA celebrada en la Sede de las Naciones Unidas (Nueva York); entró en vigor el 29 de julio de 1957. El Organismo tiene la Sede en Viena. Su principal objetivo es “acelerar y aumentar la contribución de la energía atómica a la paz, la salud y la prosperidad en el mundo entero”.

IAEA-TECDOC-1953

GUÍA PARA EL USO DE SEDIMENTOS  
EN LA RECONSTRUCCIÓN HISTÓRICA  
DE LA CONTAMINACIÓN  
EN ZONAS COSTERAS

ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA  
VIENA, 2021

## DERECHOS DE AUTOR

Todas las publicaciones científicas y técnicas del OIEA están protegidas en virtud de la Convención Universal sobre Derecho de Autor aprobada en 1952 (Berna) y revisada en 1972 (París). Desde entonces, la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (Ginebra) ha ampliado la cobertura de los derechos de autor para incluir la propiedad intelectual de obras electrónicas y virtuales. Es preciso obtener autorización para utilizar textos completos, o parte de ellos, que figuren en publicaciones del OIEA, en formato impreso o electrónico, y, por lo general, esta estará sujeta a un acuerdo sobre regalías. Se aceptan propuestas relativas a la reproducción y la traducción sin fines comerciales, que se examinarán individualmente. Las solicitudes de información deben dirigirse a la Sección Editorial del OIEA:

Dependencia de Mercadotecnia y Venta  
Sección Editorial  
Organismo Internacional de Energía Atómica  
Vienna International Centre  
PO Box 100  
1400 Viena (Austria)  
fax: +43 1 26007 22529  
tel.: +43 1 2600 22417  
correo electrónico: [sales.publications@iaea.org](mailto:sales.publications@iaea.org)  
<https://www.iaea.org/publications>

Para obtener más información sobre esta publicación, sírvase dirigirse a:

Laboratorio de Radiometría  
Laboratorios del Medio Ambiente  
Organismo Internacional de Energía Atómica  
4 Quai Antoine 1er  
98000 Mónaco  
Correo electrónico: [Official.Mail@iaea.org](mailto:Official.Mail@iaea.org)

© OIEA, 2021  
Impreso por el OIEA en Austria  
Julio de 2021

Guía Para el Uso de Sedimentos en la Reconstrucción Histórica de la  
Contaminación en Zonas Costeras  
IAEA-TECDOC-1953  
ISBN 978-92-0-333721-2 (print) | ISBN 978-92-0-333821-9 (pdf)  
Colección de Documentos Técnicos del OIEA, ISSN 2414-4223  
OIEA, Viena, 2021

## PREÁMBULO

Durante el periodo 2007-2012, el OIEA implementó el proyecto regional sobre la “Aplicación de técnicas nucleares en la solución de problemas específicos del manejo integrado de las zonas costeras en el Caribe”, RLA/7/012. El propósito principal de este proyecto fue desarrollar y mejorar las capacidades en el uso de métodos nucleares e isotópicos, que permitieran entender y proponer estrategias para mitigar la degradación de ecosistemas costeros, en apoyo a la gestión integrada de la zona costera en la región del Gran Caribe. En el proyecto participaron Cuba, Costa Rica, Colombia, República Dominicana, Guatemala, Haití, Honduras, Jamaica, México, Nicaragua, Panamá y República Bolivariana de Venezuela, con el apoyo de España y Francia, y en colaboración con Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

Una de las metodologías principales de este proyecto es el uso de sedimentos fechados con  $^{210}\text{Pb}$  como registros de cambios ambientales, incluyendo la contaminación. Como parte de la estrategia del proyecto, era de especial relevancia elaborar una guía práctica para el muestreo y preparación de cores sedimentarios para la reconstrucción histórica de la contaminación en zonas costeras en la región, que permitiera introducir las técnicas principales a utilizar, planificar el trabajo y homogeneizar las actividades a desarrollar en los laboratorios participantes a lo largo del proyecto.

En respuesta a esta necesidad, durante un taller regional en mayo de 2007 en Cumaná, República Bolivariana de Venezuela, un grupo de expertos en contaminación y cronología de sedimentos discutieron las estrategias mejor adaptadas a la realidad de la región y elaboraron una primera versión de la guía, que fue discutida y mejorada durante un curso regional desarrollado en Cienfuegos, Cuba, en septiembre de 2007. Desde el primer momento, el documento fue diseñado como un documento vivo, adaptable a las necesidades y a las dificultades encontradas durante la ejecución del proyecto. Esta publicación es la versión actualizada en 2020 del documento creado en 2007, e integra las mejores prácticas identificadas con base a la experiencia desarrollada y los resultados obtenidos durante la duración del proyecto, mateniendo la validez de las metodologías y procedimientos aquí incluidos. Si bien algunos aspectos concretos de esta publicación no son aplicables directamente a otras regiones, sí que lo puede ser su estructura y filosofía, y no debería ser difícil adaptarla a las necesidades de otros proyectos nacionales o regionales.

Esta publicación, producto del proyecto RLA/7/012, fue elaborada por y para científicos en la región, con el objetivo de servir de guía en el uso de sedimentos para la evaluación del estado actual y las tendencias históricas (~100 años) de la contaminación en ambientes costeros, con base en el estudio de cores sedimentarios fechados mediante los radionúclidos  $^{210}\text{Pb}$  y  $^{137}\text{Cs}$ . Se hace especial énfasis en los métodos de muestreo que permiten sentar las bases para un fechado pertinente; incluye el análisis de parámetros geoquímicos y sedimentológicos, útiles para mejorar la comprensión tanto de las variaciones temporales en las tasas de acumulación sedimentaria como de las concentraciones de contaminantes en los sitios de estudio; se incluyen los cuidados necesarios para asegurar la calidad de datos analíticos de las concentraciones de contaminantes y se presentan los métodos más comunes para su normalización, con el objeto de evaluar el grado de contaminación. Esta publicación es complementaria al libro “Radiocronología de sedimentos costeros utilizando  $^{210}\text{Pb}$ : modelos, validación y aplicaciones” publicado por OIEA en 2012, producto también del proyecto RLA/7/012.

El OIEA agradece al Instituto de Oceanografía (Universidad de Oriente, República Bolivariana de Venezuela) y al Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos (Cuba) por la organización de las reuniones regionales, que permitieron diseñar y desarrollar esta publicación, a los expertos y revisores que contribuyeron a su elaboración, listados al final de la publicación.

## NOTA EDITORIAL

*Esta publicación se ha preparado a partir del material original aportado por los colaboradores y no ha sido editada por el personal de los servicios editoriales del OIEA. Las opiniones expresadas son las de los colaboradores y no reflejan necesariamente las del OIEA o las de sus Estados Miembros.*

*Ni el OIEA ni sus Estados Miembros asumen responsabilidad alguna por las consecuencias que puedan derivarse del uso de esta publicación.*

*En esta publicación no se abordan cuestiones de responsabilidad, jurídica o de otra índole, por actos u omisiones por parte de persona alguna.*

*El uso de determinadas denominaciones de países o territorios no implica juicio alguno por parte de la entidad editora, el OIEA, sobre la situación jurídica de esos países o territorios, sus autoridades e instituciones o el trazado de sus fronteras.*

*La mención de nombres de empresas o productos específicos (se indiquen o no como registrados) no implica ninguna intención de violar derechos de propiedad ni debe interpretarse como una aprobación o recomendación por parte del OIEA.*

*El OIEA no es responsable de la continuidad o exactitud de las URL de los sitios web externos o de terceros en Internet a que se hace referencia en esta publicación y no garantiza que el contenido de dichos sitios web sea o siga siendo exacto o adecuado.*

## CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	Antecedentes .....	1
1.2.	Objetivo general .....	2
1.3.	Alcance .....	2
1.4.	Estructura.....	2
2.	DISEÑO DEL MUESTREO.....	2
2.1.	Metas .....	2
2.2.	Selección de los sitios de muestreo .....	3
3.	SEDIMENTOS SUPERFICIALES.....	5
3.1.	Muestreo .....	5
3.2.	Análisis de humedad y pérdidas por ignición .....	6
3.3.	Preparación de muestras para análisis subsecuentes .....	7
4.	CORES SEDIMENTARIOS.....	7
4.1.	Estrategia de muestreo de cores .....	7
4.2.	Limpieza de material para muestreo de cores .....	8
4.3.	Parámetros in situ .....	8
4.4.	Manejo de cores en el campo .....	9
4.5.	Manejo de cores en el laboratorio .....	9
4.6.	Procesamiento por tipo de core .....	11
4.7.	Conservación de las muestras.....	12
5.	REGISTROS DE MUESTREO.....	12
5.1.	Planilla de recolección de sedimentos superficiales.....	13
5.2.	Planilla de recolección de cores sedimentarios .....	13
5.3.	Planilla de caracterización de cores sedimentarios .....	13
6.	CODIFICACIÓN DE MUESTRAS.....	14
6.1.	Sedimentos superficiales .....	14
6.2.	Códigos para cores sedimentarios en el campo.....	14
6.3.	Códigos del intervalo del core sedimentario .....	14
6.4.	Códigos de las alícuotas de sedimento para análisis .....	15
7.	CRONOLOGÍA CON <sup>210</sup> Pb.....	15
7.1.	Criterio de evaluación de cores para fechado con <sup>210</sup> Pb.....	15
7.2.	Selección del core para análisis de <sup>210</sup> Pb.....	16
7.3.	Estrategia de análisis de <sup>210</sup> Pb .....	16
7.4.	Cores alterados .....	16
8.	ENSAYOS A DESARROLLAR.....	16
8.1.	Análisis recomendados.....	16
8.2.	Análisis opcionales.....	19
8.3.	Control de calidad analítico.....	20
	REFERENCIAS .....	21
	COLABORADORES EN LA REDACCIÓN Y REVISIÓN .....	23
	Eventos regionales para la preparación de esta publicación.....	23

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. ANTECEDENTES

Los sedimentos son el resultado de la acumulación de diversos tipos de constituyentes, derivados tanto del transporte continental como de origen biogénico generados in situ. Debido a su contenido de materia orgánica y de material arcilloso, pueden ser excelentes acarreadores y acumuladores de elementos tanto naturales como de origen antropogénico, tales como los metales pesados o compuestos orgánicos persistentes.

En áreas en las que los sedimentos acumulados no han sufrido bioperturbación, mezclado físico o episodios de erosión, la columna sedimentaria se constituye en un registro integral de las tendencias temporales de los cambios ocurridos en los cuerpos de agua a lo largo del tiempo, que contiene valiosa información histórica sobre las características del ambiente en el momento de su formación y de las modificaciones temporales resultado de las actividades antropogénicas [1]. Por lo anterior, la columna sedimentaria es un compartimiento natural muy útil para la reconstrucción de eventos ambientales en el pasado y tales registros pueden proveer datos específicos acerca de los flujos antropogénicos de los contaminantes procedentes del desarrollo urbano e industrial [2, 3].

Ante la ausencia de información relativa al estado y la evolución de la contaminación en la zona costera, y si existe la posibilidad de obtener registros sedimentarios inalterados, el estudio de la columna sedimentaria puede permitir la reconstrucción de la historia de la contaminación por metales y metaloides (e.g. As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, V y Zn, comúnmente referidos como metales pesados) y compuestos orgánicos persistentes (e.g. hidrocarburos aromáticos policíclicos y plaguicidas). A partir de estos registros es posible obtener datos específicos acerca de los cambios temporales tanto en las tasas de acumulación sedimentaria como en los flujos de contaminantes; sin embargo, la interpretación apropiada de esta valiosa información depende básicamente de la obtención de una tasa de acumulación confiable.

El  $^{210}\text{Pb}$  ( $T_{1/2} = 22.3$  y) es un radionúclido natural que se utiliza para fechar sedimentos depositados durante los últimos 100–150 años [4]. Este método es comúnmente usado en asociación con  $^{137}\text{Cs}$ , un radionúclido artificial cuya distribución global en los sedimentos tiene su origen en las pruebas atómicas que se realizaron alrededor del mundo, mayormente a finales de la década de 1950 e inicios de la década de 1960.

El estudio retrospectivo de la contaminación de sistemas acuáticos, basado en sedimentos fechados con  $^{210}\text{Pb}$ , requiere de la elección adecuada de sitios de muestreo, y de muestras que conserven lo mejor posible las características originales de la columna sedimentaria del sitio de estudio, es decir, que los procedimientos utilizados deben evitar mezclar, compactar o contaminar los sedimentos al momento de ser recolectados o procesados para su análisis subsecuente.

La presente publicación describe los procedimientos básicos de recolección y manejo de cores sedimentarios con el propósito de obtener un fechado pertinente, e incluye una serie de análisis de variables necesarias (e.g. humedad y porosidad del sedimento) y complementarias (e.g. tamaño de grano y contenido de carbono orgánico e inorgánico) para la interpretación de las variaciones temporales tanto de las tasas de acumulación sedimentaria como de las concentraciones de contaminantes en los sitios de estudio. Asimismo, se recomiendan prácticas para asegurar la calidad de los datos analíticos y se explican métodos de normalización regularmente utilizados para el evaluar el grado de contaminación por metales pesados.

## 1.2. OBJETIVO GENERAL

Reconstruir la historia de la contaminación por metales y metaloides (As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, V y Zn) y compuestos orgánicos (hidrocarburos aromáticos policíclicos y plaguicidas), a partir del estudio de cores sedimentarios, fechados con el método de  $^{210}\text{Pb}$ , recolectados en la zona costera del Gran Caribe.

## 1.3. ALCANCE

Esta publicación fue desarrollada por expertos en contaminación y fechado radiométrico de la región del Gran Caribe, y pone a disposición del lector los conocimientos teóricos y la experiencia práctica adquiridos en su labor de generación de conocimiento y formación de recursos humanos a lo largo de sus trayectorias y, específicamente, durante el desarrollo del proyecto RLA/7/012, por lo que muchos de los procedimientos están adaptados a las condiciones prevalentes de los sitios de estudio y laboratorios de la región. Algunas técnicas y procedimientos descritos podrían no ser aplicables directamente a otras regiones, no obstante, la filosofía del trabajo compartido y la estructura de trabajo detallados en esta publicación es útil y debería ser fácilmente adaptable a las necesidades de otros proyectos nacionales o regionales.

## 1.4. ESTRUCTURA

Esta publicación está dividida en ocho secciones. En esta Sección 1 se presentan, a modo de introducción, los antecedentes, objetivo, alcance y estructura de esta publicación. En la Sección 2 se describe el diseño del muestreo, de conformidad con los objetivos del proyecto RLA/7/012. La Sección 3 explica el procedimiento para la recolección de sedimentos superficiales, como una fase previa a la recolección de cores sedimentarios, recomendada para aquellos sitios de estudio donde no exista información básica que ayude en la elección del sitio de muestreo adecuado para el estudio retrospectivo de la contaminación. En la Sección 4 se proveen las indicaciones para la recolección de cores sedimentarios; la Sección 5 detalla el procedimiento para el registro organizado de la información referente al sitio y condiciones del muestreo de sedimentos superficiales y cores sedimentarios, y de las características específicas de estos últimos, mediante el uso de planillas diseñadas en concordancia con la estrategia de muestreo; y en la Sección 6 se presenta el proceso de codificación de muestras, que ayuda a mantener una adecuada organización del material recolectado y su distribución para análisis posteriores. La Sección 7 describe los criterios para la selección y manejo de los de cores sedimentarios que serán fechados con el método de  $^{210}\text{Pb}$  y, por último, en la Sección 8 se presentan los análisis de variables necesarias y complementarias a desarrollar, para llevar al cabo el análisis retrospectivo de la contaminación en los sitios de estudio. Los métodos analíticos se describen en detalle como Anexos, disponibles como archivos suplementarios, y pueden encontrarse en la página web individual de esta publicación, en: [www.iaea.org/publications](http://www.iaea.org/publications).

## 2. DISEÑO DEL MUESTREO

### 2.1. METAS

El diseño del muestreo es una de las fases más importante en un proyecto de investigación, ya que gran parte del éxito de cada programa de estudio está en la clara definición de los objetivos y la estrategia de muestreo. En nuestro caso en particular se pretende:

- Obtener cores sedimentarios no perturbados que permitan la reconstrucción de la geocronología reciente mediante los métodos de  $^{210}\text{Pb}$  y  $^{137}\text{Cs}$ ;

- Determinar la concentración de elementos de interés ecológico, tales como Ag, As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Sn, V, Zn; así como de otros elementos de interés geoquímico (Al, Ba, Br, I, Ca, Cl, Fe, Mg, Mn, Na, K, P, Rb, Si, Sr, Ti y Zr) acumulados en la columna sedimentaria de los sitios de interés;
- Identificar y cuantificar el contenido de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) y plaguicidas organoclorados, presentes en la columna sedimentaria de las diferentes áreas de estudio. Los compuestos específicos a estudiar son:
  - Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs): Acenafteno, acenaftileno, antraceno, benzo[*a*]antraceno, benzo[*a*]pireno, benzo[*e*]pireno, benzo[*b*]fluoranteno, benzo[*k*]fluoranteno, benzo[*g,h,i*]perileno, bifenilo, criseno, dibenzo[*a,h*]antraceno, dibenzotiofeno, fenantreno, fluoranteno, fluoreno, indeno[*1,2,3c,d*]pireno, naftaleno, perileno, pireno, 1-metil naftaleno, 2-metil naftaleno, 2,6-dimetil naftaleno, 2,3,5-trimetil naftaleno, 1-metil fenantreno;
  - Plaguicidas organoclorados (POCs): Aldrin, alpha-clordano, dieldrin, 4,4'-DDD, 4,4'-DDE, 4,4'-DDT, endrin, endosulfan I, endosulfan II, endosulfan sulfato, endrin aldehido, endrin cetona, alpha-HCH, beta-HCH, delta-HCH, gamma-HCH (Lindano), heptacloro, heptacloro epóxido, metoxicloro, gamma-clordano, cis-nonacloro, trans-nonacloro, 2,4'-DDD, 2,4'-DDE, 2,4'-DDT.
- Determinar si es posible, el grado de contaminación por metales, hidrocarburos aromáticos policíclicos y plaguicidas organoclorados en cada sitio de estudio;
- Cuantificar la variación temporal de los flujos ( $\text{g cm}^{-2} \text{y}^{-1}$ ) de los contaminantes de interés en cada una de las áreas de muestreo.

## 2.2. SELECCIÓN DE LOS SITIOS DE MUESTREO

### 2.2.1. Información básica para el muestreo

Una vez se ha decidido cuál es el área de interés, para la selección de los sitios de recolección de los cores sedimentarios se requiere contar con tanta información básica como sea posible, incluyendo:

- fotos aéreas/satelitales;
- mapa batimétrico;
- registro de dragados;
- hidrodinámica de la zona;
- inventario de focos de contaminación;
- cuencas hidrográficas de influencia;
- mapa de distribución de tamaño de grano;
- mapas de contaminación superficial;
- datos de calidad del agua e información sobre las poblaciones bentónicas.

### 2.2.2. Características del sitio de muestreo

Cuando se tiene como objetivo realizar una reconstrucción histórica de la contaminación a partir de cores sedimentarios, los sitios recomendados para la recolección de cores sedimentarios son aquellos que presentan:

- depósito preferencial de sedimentos finos (fangosos);
- una tasa de sedimentación entre 0.25 y 1.0 cm y<sup>-1</sup>;
- una profundidad mínima de 15 m;
- cierto grado de compactación (evitar el sedimento demasiado poroso, susceptible a la resuspensión); y
- condiciones de hipoxia–anoxia (contenido de oxígeno disuelto <0.1 mg L<sup>-1</sup>), en las cuales la actividad biológica es mínima (macroinvertebrados bentónicos bivalvos, poliquetos, etc.).

Con el objeto de reducir la posibilidad de problemas de mezcla, se recomienda evitar los sitios con actividad de dragado conocida; pesca de arrastre; fondeadero de embarcaciones o tránsito de embarcaciones impulsadas con varas en el fondo. Asimismo, se sugiere, realizar el muestreo en época de secas.

Se deberán elegir sitios que evidencien condiciones de impacto antrópico tales como descargas industriales o cambio en el uso del suelo y del agua; asimismo, se recomienda mantenerse dentro del área de influencia de las fuentes de contaminación (la cual dependerá de cada sitio en particular).

En el caso de aquellos lugares en los cuales no existan trabajos preliminares que aporten información básica para la elección del sitio de muestreo, antes de la recolección de cores sedimentarios, se recomienda realizar un estudio de sedimentos superficiales en el área de interés (ver Sección 3).

### **2.2.3. Recomendaciones generales durante el muestreo**

A continuación, se presentan algunas recomendaciones básicas durante la campaña de muestreo:

- Desarrollar el plan de campaña de muestreo en conjunto con todo el personal involucrado en el mismo;
- Verificar que todo el personal involucrado en el muestreo esté capacitado para cumplir con los objetivos establecidos en el diseño del muestreo;
- Mantener las medidas de seguridad durante el muestreo y navegación;
- Asegurar que todo el personal involucrado en el muestreo utilice guantes adecuados y evite el uso de protectores solares y repelentes, ya que estos productos pueden contaminar los cores. Se recomienda el uso de guantes de nitrilo, ya que algunos otros materiales pueden contaminar las muestras y afectar los resultados de los análisis de compuestos orgánicos);
- No fumar durante el muestreo;
- De ser posible, detener el motor de la embarcación y recolectar la muestra en el lado contrario al sitio de descarga del agua de lastre o de las sentinas.

### 3. SEDIMENTOS SUPERFICIALES

Los pasos recomendados para el estudio de sedimentos superficiales se presentan en la Fig. 1. Esta secuencia se inicia a partir de la selección del sitio de muestreo, de conformidad con las instrucciones descritas previamente en la Sección 2.2.

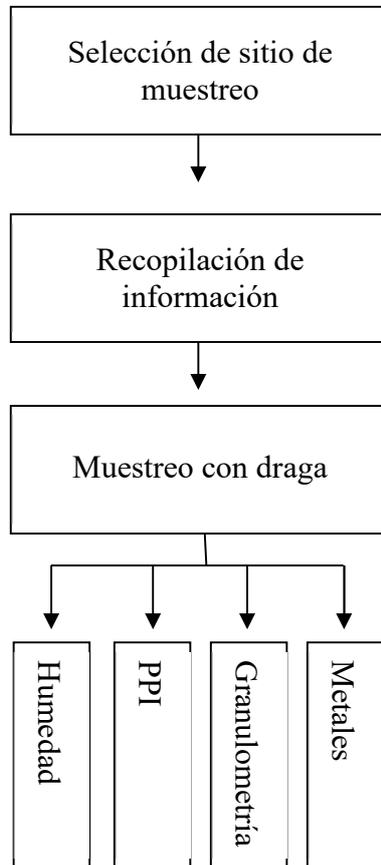


FIG. 1. Secuencia de trabajo para el estudio de sedimentos superficiales.

#### 3.1. MUESTREO

Los sedimentos superficiales serán muestreados en una rejilla de 20 a 30 estaciones de muestreo, utilizando una draga tipo Van Veen.

- Antes de ser utilizada, la draga deberá lavarse para retirar cualquier rastro de sedimento de muestreos previos; así como deberá enjuagarse cada vez que se use, con agua del sitio de muestreo;
- Los contenedores y utensilios de plástico que serán utilizados para manipular muestras destinadas al análisis de metales deben ser lavados secuencialmente en HCl (2N) y HNO<sub>3</sub> (2N), enjuagados con agua destilada y secados al aire, protegidos de fuentes de contaminación;
- Se deberá realizar un registro de información básica de cada sitio de muestreo, utilizando el formato diseñado para este propósito (ver Sección 5);

- Se tendrá cuidado de recolectar solamente la capa superficial de los sedimentos recuperados con la draga (1 cm de espesor). Esto tiene el propósito de asegurar homogeneidad en la estrategia de muestreo y evitar que sedimentos recientes se mezclen con sedimentos demasiado antiguos. Esta separación deberá realizarse con la ayuda de una espátula del material adecuado para evitar la contaminación de la muestra; por ejemplo, de plástico en el caso de las muestras que serán analizadas por metales pesados;
- Las muestras de sedimento se colocarán en bolsas de plástico de peso conocido (taradas) y se registrará el peso húmedo;
- Con el fin de evitar la confusión y pérdida de material en los diferentes pasos del proceso del estudio, las muestras deberán ser cuidadosamente identificadas y etiquetadas de conformidad con las instrucciones provistas en la Sección 6. Se deberá asegurar que las etiquetas estén marcadas firmemente en el exterior de la bolsa que contiene la muestra; y de preferencia, se deberá colocar una segunda bolsa plástica que evite que la etiqueta sea borrada.

### 3.2. ANÁLISIS DE HUMEDAD Y PÉRDIDAS POR IGNICIÓN

Los sedimentos deberán ser analizados por humedad y pérdidas por ignición (descritos en detalle en el Anexo I, en archivos suplementarios a esta publicación). Ambos parámetros son fundamentales con el objeto de contar con las mejores condiciones para un fechado confiable de los cores sedimentarios. El porcentaje de humedad nos permitirá estimar los valores de la densidad in situ del sedimento, esencial para evaluar el efecto de la compactación del sedimento con la profundidad, y los valores de peso seco, que se obtienen durante el análisis de humedad, permitirán estimar la profundidad másica del sedimento, una variable fundamental para el fechado con  $^{210}\text{Pb}$  (ver [5]). Por otro lado, el análisis de es útil para estimar el contenido de materia orgánica en los sedimentos [6], cuyas variaciones respecto a la profundidad pueden proveer indicios sobre la potencial perturbación del sedimento [7].

Para el análisis de humedad (%), las muestras se secarán idealmente por liofilización, o alternativamente, en estufa a una temperatura de  $<45^{\circ}\text{C}$  y se registrará el peso seco. Se ha decidido utilizar esta temperatura para evitar la pérdida de componentes volátiles del sedimento, tales como mercurio o compuestos orgánicos. Es posible que haya pérdidas de metil mercurio o de los compuestos orgánicos más volátiles, pero también es factible que esta pérdida ocurriera antes de la recolección de las muestras, debido a las altas temperaturas ambientales en la región.

Las muestras se pesarán en balanza granataria con una precisión mínima de 0.001 g. Se recomienda verificar el peso de la muestra seca hasta encontrar un valor constante, es decir, hasta que la diferencia entre pesadas sea  $\leq 1\%$ . El porcentaje de humedad de la muestra se calcula mediante la ecuación E.1:

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{(\text{Peso fresco} - \text{Peso seco})}{\text{Peso fresco}} \times 100 \quad (\text{E.1})$$

Las muestras se disgregarán a mano para separar las alícuotas necesarias para los análisis subsecuentes (descritos en Sección 8).

Para el análisis de pérdidas por ignición (PPI<sub>550</sub>) se pesarán 0.5 g de sedimento seco en un crisol de porcelana (utilizar una balanza granataria, con una precisión mínima de 0.001 g). La muestra se calcinará en una mufla a 550°C durante 4 horas (tomar el tiempo una vez que la temperatura deseada ha sido alcanzada y estabilizada). La muestra se dejará enfriar hasta 100°C y se transferirá a un desecador, donde se dejará enfriar a temperatura ambiente antes de volver a pesarse. Las PPI<sub>550</sub> se calculan con la ecuación E.2:

$$PPI_{550} (\%) = \frac{(\text{Peso inicial} - \text{Peso calcinado})}{\text{Peso inicial}} \times 100 \quad (\text{E.2})$$

Los laboratorios deberán garantizar que el análisis de las muestras sea reproducible y para ello es importante tener en consideración los diversos factores que afectan el análisis de PPI<sub>550</sub>; por ejemplo, la posición de la muestra en el interior de la mufla. Se recomienda que las muestras se introduzcan hacia el fondo de la mufla, ya que las muestras colocadas cerca de la puerta del equipo estarán sujetas a una menor temperatura que aquellas al fondo; asimismo, debe asegurarse que las muestras estén bien distribuidas en los crisoles y evitar que estos sean demasiado pequeños.

### 3.3. PREPARACIÓN DE MUESTRAS PARA ANÁLISIS SUBSECUENTES

Una vez realizados los análisis de humedad y de PPI<sub>550</sub>, el resto de la muestra se separará en bolsas de plástico, de tamaño adecuado a la cantidad de muestra requerida para los análisis subsecuentes (ver Sección 8). Se hace notar que para cada análisis se ha definido una cantidad mínima de material, pensada para aquellas muestras de sedimento de las que, debido a un alto contenido de humedad, no se cuente con las cantidades óptimas de sedimento para cada análisis.

- Cada bolsa deberá ser codificada apropiadamente de acuerdo a las instrucciones de la Sección 6.
- Se separarán de 1 a 2 g de sedimento SIN MOLER para el análisis de tamaño de grano por difracción de rayos láser.

El resto de la muestra se molerá en mortero, de preferencia de ágata. El mortero debe ser previamente lavado con jabón libre de fosfatos y enjuagado con agua corriente; posteriormente deberá recibir un enjuague con agua destilada y otro con HCl diluido (2M); finalmente, deberá enjuagarse 3 veces con agua desionizada para eliminar por completo los residuos ácidos. Se recomienda limpiar muy bien el mortero de ágata entre muestras.

## 4. CORES SEDIMENTARIOS

### 4.1. ESTRATEGIA DE MUESTREO DE CORES

Una vez recopilada la información documental generada por estudios previos en la zona se podrán elegir los sitios mas convenientes para la recolección de los cores sedimentarios. A continuación, se listan las indicaciones seguidas para el muestreo en el proyecto RLA/7/012:

- Número y localización de estaciones: se escogerán 3 estaciones de muestreo (denominadas A, B y C) por área de interés;
- Número de cores sedimentarios: debido a la incompatibilidad que existe para la manipulación de muestras, dependiendo del análisis a que serán destinadas (uso de plástico para análisis de metales, y de vidrio o metal para el análisis de compuestos orgánicos) se recolectarán 3 cores sedimentarios en cada estación;

- Propósito de los cores: de conformidad con el Cuadro 1, el core I se destinará al análisis de radionúclidos (geocronología), metales y parámetros geoquímicos; el core II para contaminantes orgánicos (hidrocarburos aromáticos policíclicos y plaguicidas organoclorados); y el core III se conservará como testigo;
- Para la recolección de las muestras se utilizará un nucleador de gravedad tipo UWITEC, que permite recolectar 3 cores de manera simultanea, aunque en caso necesario, también permite la recolección de cores de forma individual;
- Toda la información relativa al muestreo de cores sedimentarios, incluyendo localización y características del sitio de muestreo deberá ser cuidadosamente registradas en la planilla de recolección de cores de sedimentos (ver Sección 5).

CUADRO 1. CÓDIGOS NUMÉRICOS PARA LOS CORES

Core	Análisis a realizar
I	Radionúclidos, metales y parámetros geoquímicos
II	Contaminantes orgánicos
III	Testigo

## 4.2. LIMPIEZA DE MATERIAL PARA MUESTREO DE CORES

### 4.2.1. Equipo de muestreo

Antes de ser utilizados, los nucleadores serán lavados para retirar cualquier rastro de sedimento de muestreos previos y serán enjuagados cada vez con agua del sitio de muestreo.

### 4.2.2. Material para metales pesados

Antes de ser utilizados, los contenedores y utensilios de plástico que serán utilizados para manipular muestras destinadas al análisis de metales deben ser lavados secuencialmente en HCl (2N) y HNO<sub>3</sub>(2N), enjuagados con agua destilada (o milliQ) y secados al aire, protegidos de fuentes de contaminación.

### 4.2.3. Material para contaminantes orgánicos

Los contenedores y utensilios de vidrio a utilizar para manipular muestras destinadas al análisis de contaminantes orgánicos deben ser lavados con agua y jabón antes de usarse. Se recomienda hornear el material de vidrio a 450°C por al menos cuatro horas, para eliminar trazas de contaminantes orgánicos; o alternativamente, enjuagar el material de vidrio y teflón con acetona (calidad pesticida) para eliminar el agua y luego hexano para eliminar los compuestos orgánicos.

## 4.3. PARÁMETROS in situ

Los parámetros complementarios que se recomienda determinar durante la recolección de las muestras se listan a continuación:

- temperatura (Sonda multiparamétrica);
- salinidad (Sonda multiparamétrica);
- oxígeno disuelto (Sonda multiparamétrica);
- profundidad de la columna de agua (Ecosonda);
- parámetros meteorológicos (temperatura del aire, velocidad y dirección del viento), si la embarcación cuenta con estación meteorológica.

#### 4.4. MANEJO DE CORES EN EL CAMPO

##### 4.4.1. Inspección del core

Considerando que el objetivo principal es reconstruir la geocronología reciente de la contaminación (100–150 años), cada vez que se recolecte un core, se deberá realizar una inspección visual para verificar:

- que tenga una superficie horizontal;
- la ausencia de vestigios de mezclado o perturbación, ya sea física o biológica, tales como grietas, burbujas de aire atrapado, resuspensión, parches de mezcla de sedimento de diferentes colores o texturas, conchas de bivalvos y tubos de poliquetos, etc.

En caso de que algún core presente una superficie inclinada o alguna indicación de mezcla, se recomienda desecharlo y reintentar la recolección.

##### 4.4.2. Cuidados durante el muestreo

Una vez tomados los cores de sedimentos en la estación seleccionada, se deberá:

- Completar los datos correspondientes en la planilla de recolección de cores (Sección 5.2.);
- Codificar y etiquetar los cores cuidadosamente, como se indica en la Sección 6.2.;
- Se tomará una fotografía técnica en la que el core esté acompañado de una escala métrica de referencia. Si no es posible hacerlo en el campo, se tomará en el laboratorio tan pronto sea posible;
- Asegurar que durante la operación de muestreo los cores se mantengan en el lugar más fresco de la embarcación, protegidos del sol y de cualquier posibilidad de contaminación por polvo o lluvia (colocar su tapa o una bolsa plástica sobre cada tubo);
- Mover los cores con precaución, evitando golpearlos durante el transporte;
- Manipularlos muy cuidadosamente en todo momento en posición vertical, para lo cual se colocarán en una rejilla, que impida que se incline para evitar mezclado;
- Conservarlos en condiciones de refrigeración (4°C), siempre que sea posible.

#### 4.5. MANEJO DE CORES EN EL LABORATORIO

Se recomienda dejar reposar los cores en el laboratorio (en el sitio en que será procesado) al menos 24 h, para asegurar la sedimentación de partículas en suspensión en la superficie acuosa del core.

Si no se ha realizado en el campo, se tomará una fotografía técnica en la que el core esté acompañado de una escala métrica de referencia.

Se eliminará la mayor cantidad posible del agua sobrenadante, mediante una manguera flexible de plástico transparente (diámetro menor a 1 cm), cuidando de no resuspender o succionar la capa superficial del sedimento. El agua sobrenadante remanente se recuperará con ayuda de una pipeta, se evaporará parcialmente (volumen máximo de 10 ml) en estufa a temperatura <math><60^{\circ}\text{C}</math>, y se adicionará a la primera sección del core.

#### **4.5.1. Corte del core**

Los cores se cortarán utilizando el instrumento de corte de acero inoxidable provisto junto con los nucleadores de gravedad (por ejemplo, UWITEC™ o similar). Se deberá tener cuidado de descontaminar los instrumentos de corte entre muestras por medio de un enjuague con agua destilada. Las muestras para el análisis de radionúclidos y metales se colocarán en bolsas de plástico, codificadas de conformidad con la Sección 6 de esta publicación.

Con el objetivo de obtener una buena resolución en el análisis cronológico, los cores se cortarán en secciones de 1 cm de espesor. Considerando que la tasa de sedimentación en una zona costera es de 0.25 a 1.0 cm año<sup>-1</sup> y asumiendo una tasa promedio de 0.5 cm año<sup>-1</sup>, en 50 cm se esperaría contar con sedimentos acumulados durante 100 años. Tomando en cuenta que el tubo del nucleador UWITEC™ tiene un diámetro de ~9 cm, una capa de 1 cm de espesor tendría aproximadamente 95 g de sedimento húmedo ( $20.25 \text{ cm}^2 \times 3.1416 \times 1 \text{ cm} \times 1.5 \text{ g cm}^{-3}$ ). Dado que las capas más superficiales suelen tener altos niveles de humedad (>80%) es probable que no se disponga de suficiente masa para los análisis posteriores, por lo que se deberá priorizar el uso de la muestra, caso por caso (e.g. reutilizar muestras analizadas por métodos no destructivos, unir secciones, etc.).

Es importante tener en consideración que la extrusión del core sedimentario provoca fricción del sedimento al interior del tubo muestreador y que, debido a la cohesividad de algunos sedimentos (sobre todo aquellos altamente lodosos), conforme el sedimento se desplaza hacia la superficie, quedan residuos de sedimento adheridos a las paredes interiores del tubo muestreador, con lo cual es posible contaminar las muestras más profundas con restos de las muestras más superficiales. Por lo anterior, para eliminar el riesgo de contaminación generado por el contacto con el tubo muestreador, se sugiere que siempre que sea posible, se utilice un anillo de material inocuo (metálico, de plástico o un vaso de vidrio, dependiendo del análisis que se vaya a efectuar posteriormente) con un diámetro un poco más pequeño que el tubo muestreador, para cortar la porción más externa (una circunferencia de al menos 0.5 cm de espesor) de cada sección cortada.

Se recomienda el uso de guantes de nitrilo (de preferencia sin talco) para manipular las muestras, así como utilizar únicamente material de plástico para el manejo de las submuestras de metales pesados. Asimismo, sólo deberá utilizarse instrumentos de vidrio, acero inoxidable y papel aluminio, para el manejo de las muestras que serán destinadas al análisis de contaminantes orgánicos.

Una vez iniciado el corte de cada submuestra, se deberán registrar inmediatamente las características del sedimento, utilizando la planilla de caracterización de los cores (Sección 5.3.). De ser posible, se recomienda realizar fotografías de cada corte.

Se recomienda separar los macrorestos presentes en los intervalos del core, tales como trozos de madera, pedazos de rocas y conchas, utilizando una pinza: (a) de plástico, en el caso del core I; o (b) de acero inoxidable, para el sedimento que será analizado por compuestos orgánicos del core II. Los macrorestos se almacenarán en bolsas de nylon y se registrará la profundidad a la que fueron encontrados en la Planilla de caracterización de los cores (Anexo I, en archivos suplementarios). En el caso de conchas de organismos, se recomienda identificar la especie correspondiente.

#### 4.6. PROCESAMIENTO POR TIPO DE CORE

##### 4.6.1. Core I: radionúclidos, metales y parámetros geoquímicos

Transferir las muestras de sedimento fresco, con una espátula plástica, a bolsas de plástico de peso conocido (tarados). Pesarse la muestra húmeda en una balanza con una precisión mínima de 0.001 g. Secar y determinar los porcentajes de humedad y de pérdidas por ignición de las muestras (Sección 4.2., y anexos III.1 y III.2, en archivos suplementarios).

Se separarán de 1 a 2 g de sedimento SIN MOLER para el análisis de tamaño de grano por difracción de rayos láser. El resto de la muestra será molida en mortero (de preferencia de ágata) para su distribución entre los laboratorios analíticos que realizarán los análisis subsecuentes. El mortero debe ser previamente lavado con jabón libre de fosfatos y enjuagado con agua corriente; posteriormente deberá recibir un enjuague con agua destilada y otro con HCl diluido (2M); finalmente, deberá enjuagarse 3 veces con agua desionizada para eliminar por completo los residuos ácidos. Tomar en cuenta que la molienda deberá ser realizada de las capas más profundas a las más recientes, para reducir los riesgos de contaminación entre muestras. Asimismo, se recomienda limpiar muy bien el mortero de ágata entre muestras; y lavar el mortero cada vez que se cambie de core.

Las alícuotas para los análisis subsecuentes serán colocadas en bolsas de plástico, de tamaño adecuado a la cantidad de muestra requerida para cada análisis (ver Sección 8), donde se muestran las cantidades mínimas y óptimas de sedimento necesarias para los análisis.

Se hace notar que la cantidad mínima ha sido pensada para los intervalos del core sedimentario en los cuales, debido a un alto contenido de humedad, no se cuenta con las cantidades óptimas de sedimento para cada análisis. No obstante, se hace hincapié en que es importante separar la cantidad óptima siempre que sea posible.

##### 4.6.2. Core II: contaminantes orgánicos

Debido a que el contacto de los sedimentos con plástico podría provocar una contaminación por ftalatos (compuestos que se utilizan para dar flexibilidad a muchos plásticos como el PVC), el sedimento que se usará para analizar los contaminantes orgánicos será manipulado únicamente con instrumentos de vidrio o metálicos. Se recomienda evitar que los sedimentos tengan contacto con las paredes del tubo muestreador, por consiguiente, la muestra correspondiente será obtenida del centro del core, separando el exterior con la ayuda de un aro de teflón o vidrio (podría utilizarse un vaso de diámetro menor al nucleador).

La muestra húmeda será colocada en recipientes (o recortes) de papel de aluminio prepesados (tarados), se registrará el peso húmedo, se secará hasta peso constante y se calculará el contenido de humedad (ver Sección 3.2.). Las muestras secas se disgregarán en mortero de porcelana para su distribución.

Las alícuotas de sedimento destinadas al análisis de componentes orgánicos se colocarán en recipientes (o recortes) de papel aluminio (precalcinado a 450 °C por 4 h) y, una vez bien envueltas, se introducirán en bolsas de plástico para su distribución. El Cuadro 2 (Sección 8) muestra las cantidades mínimas y óptimas de sedimento necesarias para los análisis. Las muestras de sedimentos destinadas al análisis de compuestos orgánicos deberán ser conservadas en refrigeración (a 4°C) hasta su análisis.

#### **4.6.3. Core III: testigo**

El core III (testigo) se conservará cortado y seco para ser utilizado en caso de necesidad de análisis adicionales no considerados anteriormente. Este core será procesado simultáneamente para ser analizado tanto por metales como por compuestos orgánicos; por tanto, las muestras de cada sección serán divididas en 2 alícuotas: (a) una para el análisis de componentes orgánicos obtenida de la fracción central del core, utilizando un vaso de vidrio; y (b) la otra, colectando el sedimento remanente para el análisis de metales, utilizando los utensilios de plástico. Ambas deberán ser apropiadamente codificadas (ver Sección 6).

Las muestras destinadas al análisis de metales se colocarán en bolsas de plástico y las muestras que serán utilizadas para el análisis de componentes orgánicos, se serán depositadas en recipientes (o recortes) de papel aluminio (ver secciones 5.6.1 y 5.6.2.). En ambos casos, se registrarán los pesos húmedos y se secarán hasta peso constante, en estufa a temperatura menor a 45°C, con el objeto de determinar el contenido de humedad (ver Sección 3.2.).

Una vez secas, las muestras se disgregarán en mortero de porcelana y serán conservadas como testigo para ulteriores análisis.

#### **4.7. CONSERVACIÓN DE LAS MUESTRAS**

Es importante que una vez que las muestras secas destinadas al análisis de metales pesados se conserven en un desecador para evitar que vuelvan a tomar humedad del ambiente durante el tiempo de espera para ser analizadas. Los laboratorios deberán asegurarse de que las muestras estén secas y, en caso contrario, se deberá volver a secar el material antes de proceder a cualquier análisis.

Las muestras de sedimento seco para el análisis de compuestos orgánicos deberán ser conservadas en refrigeración (a 4°C) hasta su análisis. En los laboratorios analíticos, las muestras deberán ser igualmente conservadas en refrigeración hasta su extracción; los extractos de las muestras serán mantenidos a 4°C hasta su análisis instrumental; luego de lo cual deben ser también almacenados en oscuridad a -20°C. Se recomienda guardar congelados los extractos restantes del análisis de las muestras, así como los sedimentos sobrantes, hasta el final del estudio.

### **5. REGISTROS DE MUESTREO**

Con la finalidad de poseer información básica del lugar y condiciones del sitio de muestreo para el momento de la recolección, se debe completar manualmente la planilla de recolección correspondiente.

### 5.1. PLANILLA DE RECOLECCIÓN DE SEDIMENTOS SUPERFICIALES

La información básica del muestreo de sedimentos superficiales (Anexo I, en archivos suplementarios) contempla los siguientes datos:

- fecha (día, mes, año, hora);
- nombre de los responsables de la campaña y de la toma de muestras;
- número de estación;
- localización geográfica (coordenadas);
- profundidad del sitio de muestreo.

En el área de observaciones, se detallará cualquier pormenor que permita identificar características específicas de la muestra (desembocadura de un río, color, olor, presencia de restos de conchas en el sedimento, etc.).

En la medida de lo posible sería conveniente contar con información complementaria tal como: temperatura, salinidad y oxígeno disuelto, que pueden ser medidos con sonda multiparamétrica; así como, información sobre parámetros meteorológicos (temperatura del aire, velocidad y dirección del viento), si la embarcación cuenta con estación meteorológica.

### 5.2. PLANILLA DE RECOLECCIÓN DE CORES SEDIMENTARIOS

La información básica del muestreo de cores sedimentarios deberá registrarse en la planilla correspondiente que se presenta en el Anexo I (en archivos suplementarios), incluyendo los siguientes datos:

- Ubicación geográfica (coordenadas);
- Fecha y hora del muestreo (día, mes, año, hora);
- Datos hidrográficos (dirección y velocidad de las corrientes y mareas, temperatura, etc);
- Información meteorológica (dirección y velocidad del viento);
- Identificación de la muestra (cilindro usado o muestreador, código del core, longitud del core);
- Nombre de los responsables de la campaña y de la toma de muestras.

En el área de observaciones, se detallará a qué profundidades se producen cambios de color y otras características macroscópicas que se observen desde el exterior (conchas, espacios vacíos, burbujas, etc.).

### 5.3. PLANILLA DE CARACTERIZACIÓN DE CORES SEDIMENTARIOS

Se deberán registrar las características de los sedimentos tales como olor, textura aparente de la muestra, color (de conformidad con la tabla Munsell) y presencia de macrorestos utilizando la planilla correspondiente que se encuentra en el Anexo I (en archivos suplementarios). En esta planilla también, deberán incluirse los pesos húmedo, seco y calcinado, que permitirán calcular los contenidos de humedad y el porcentaje de pérdidas por ignición de cada muestra.

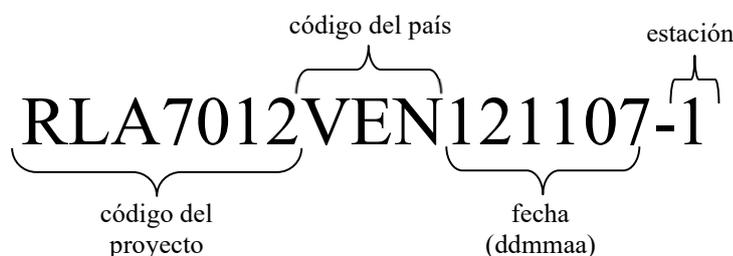
## 6. CODIFICACIÓN DE MUESTRAS

A fin de que haya una identificación unívoca de las muestras recolectadas, se asignó un código general, compuesto por el Código del Proyecto, el Código del País, la Fecha de recolección (ddmmaa) y la Estación de muestreo, que será ampliado para distinguir entre las muestras de sedimento superficial (Sección 6.1.), los cores sedimentarios (secciones 6.2. y 6.3) y las muestras que se distribuirán para los análisis de laboratorio (Sección 6.4.).

Los códigos de país definidos para este proyecto son: CUB (Cuba), COS (Costa Rica), COL (Colombia), DOM (República Dominicana), GUA (Guatemala), HAI (Haití), HON (Honduras), JAM (Jamaica), MEX (México), NIC (Nicaragua), PAN (Panamá) y VEN (República Bolivariana de Venezuela).

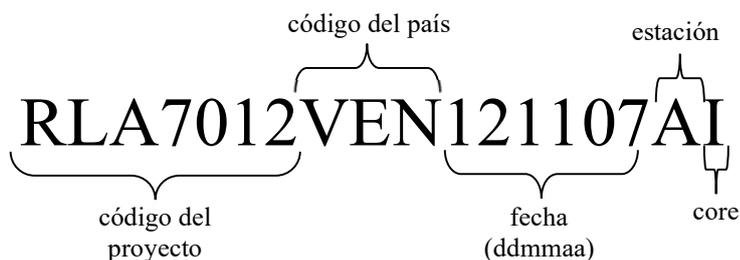
### 6.1. SEDIMENTOS SUPERFICIALES

Las muestras de sedimentos superficiales se etiquetaron como sigue: Código del Proyecto, Código del País, Fecha (ddmmaa), Estación (número arábigo), de conformidad al ejemplo que se muestra:



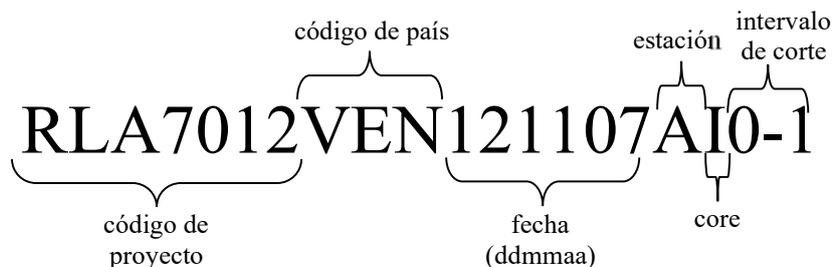
### 6.2. CÓDIGOS PARA CORES SEDIMENTARIOS EN EL CAMPO

Los cores fueron etiquetados de la siguiente manera: Código del Proyecto, Código del País, Fecha (ddmmaa), Estación (letra), #Core (en número romano) de conformidad al ejemplo que se muestra a continuación:



### 6.3. CÓDIGOS DEL INTERVALO DEL CORE SEDIMENTARIO

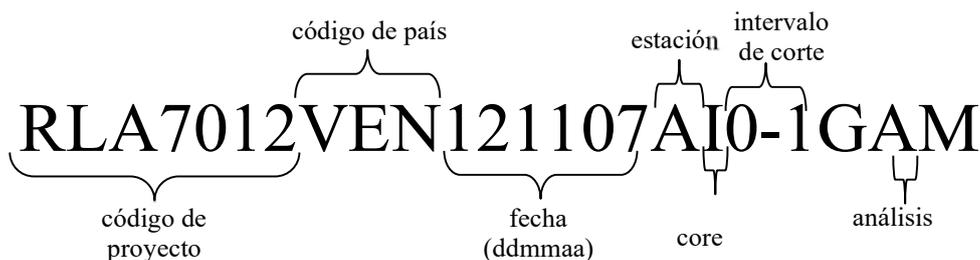
Siguiendo el mismo ejemplo, las secciones de los cores de sedimentos se codificaron de la siguiente manera: al código del core, se le añadirá la indicación del intervalo de corte (en cm) de conformidad al ejemplo que se presenta a continuación:



Este código será registrado en la Planilla de caracterización de los cores (ver Anexo I, en archivos suplementarios).

#### 6.4. CÓDIGOS DE LAS ALÍCUOTAS DE SEDIMENTO PARA ANÁLISIS

Una vez pesadas las muestras secas serán divididas de conformidad a los análisis que serán realizados. Las alícuotas de sedimento de cada sección del core deben codificarse de la siguiente manera: al código del intervalo del core se le añadirá un código que identificará el tipo de análisis al que será destinada, de conformidad con el Cuadro 2 (Sección 8). A continuación, se presenta un ejemplo, considerando una muestra superficial (intervalo 0–1 cm) destinada al análisis de espectrometría gama (GAM) del proyecto RLA7/012:



Con la finalidad de evitar la pérdida de alguna etiqueta por desprendimiento o daño causado por la humedad o contacto con el sedimento, se recomienda que las etiquetas se coloquen entre dos bolsas en cuyo interior se conservará la submuestra.

## 7. CRONOLOGÍA CON $^{210}\text{Pb}$

La recolección de un core sedimentario inalterado en la zona costera puede resultar difícil debido a todas las posibles fuentes de perturbación del sedimento que existen (p.e. alta actividad biológica, mezcla física, entre otras). Por esta razón, se recomienda que, antes de iniciar los análisis de contaminantes se asegure que se cuenta con un core sedimentario que sea útil para la obtención de geocronologías con  $^{210}\text{Pb}$ .

### 7.1. CRITERIO DE EVALUACIÓN DE CORES PARA FECHADO CON $^{210}\text{Pb}$

Los datos de  $\text{PPI}_{550}$  son una buena aproximación de las concentraciones de la materia orgánica de los sedimentos [6] y el perfil de  $\text{PPI}_{550}$  respecto a la profundidad permitirá estimar de manera gruesa, si las concentraciones de la materia orgánica presentan la tendencia típica de decaimiento exponencial, resultado de la descomposición por acción bacteriana [8].

Los perfiles típicos de degradación de la materia orgánica normalmente sólo pueden ser observados en una columna sedimentaria mínimamente alterada, así que un perfil de concentraciones de PPI<sub>550</sub> que muestre esta tendencia, indicaría la ausencia de mezcla en el core sedimentario y, por lo tanto, buenas posibilidades de proveer un fechado confiable con el método de <sup>210</sup>Pb. Se recomienda que la selección del core que será utilizado para el fechado con <sup>210</sup>Pb esté basada en los datos de PPI<sub>550</sub> del core I de cada estación de muestreo.

## 7.2. SELECCIÓN DEL CORE PARA ANÁLISIS DE <sup>210</sup>Pb

Bajo la suposición descrita en la Sección 7.1., el análisis de <sup>210</sup>Pb con fines de fechado será realizado en el core I de la estación de muestreo cuyo perfil de PPI<sub>550</sub> presente la mejor aproximación a un decaimiento exponencial con la profundidad.

## 7.3. ESTRATEGIA DE ANÁLISIS DE <sup>210</sup>Pb

Se recomienda realizar inicialmente una malla de prueba que incluya análisis a cada 5 cm de profundidad del core sedimentario (es decir, en un core de 50 cm de profundidad, se analizarán 10 muestras). Estos datos permitirán realizar una evaluación preliminar de las tendencias del perfil de <sup>210</sup>Pb respecto a la profundidad, con lo cual se determinará la factibilidad de obtener un fechado confiable a partir de ese core. El perfil de <sup>210</sup>Pb obtenido debería mostrar tendencias comparables a la desintegración exponencial, en cuyo caso se analizará la totalidad de los intervalos en los cuales exista <sup>210</sup>Pb en exceso.

Sólo se deberán realizar los análisis geoquímicos y de contaminantes, cuando se haya confirmado la pertinencia del perfil de <sup>210</sup>Pb para obtener un fechado confiable.

## 7.4. CORES ALTERADOS

En la Fig. 2 se presenta el diagrama de flujo que describe la secuencia de trabajo propuesta con los cores sedimentarios. En caso de que se determine que el core I del sitio A no es adecuado para ser fechado debido a que se encuentra perturbado, se realizará el análisis de <sup>210</sup>Pb del core I del sitio B y se seguirá el mismo procedimiento descrito en las secciones 8.2. y 8.3. En el caso de que se determine que el core I del sitio B se encuentra igualmente alterado, se procederá al análisis del core I del sitio C.

# 8. ENSAYOS A DESARROLLAR

Se recomienda que antes de comenzar a analizar las muestras de sedimento, se realicen ensayos previos con materiales de referencia para verificar la precisión y exactitud del método. En el Anexo II (archivos suplementarios) se incluyen un formato y un ejemplo para el informe de resultados analíticos, los cuales deberán presentarse en unidades del sistema internacional.

## 8.1. ANÁLISIS RECOMENDADOS

Los métodos listados a continuación, utilizados en el proyecto RLA/7/012 están descritos en detalle en el Anexo III (archivos suplementarios); las cantidades mínima y óptima del material requerido para cada análisis se describen en el Cuadro 2, al final de esta Sección 8.

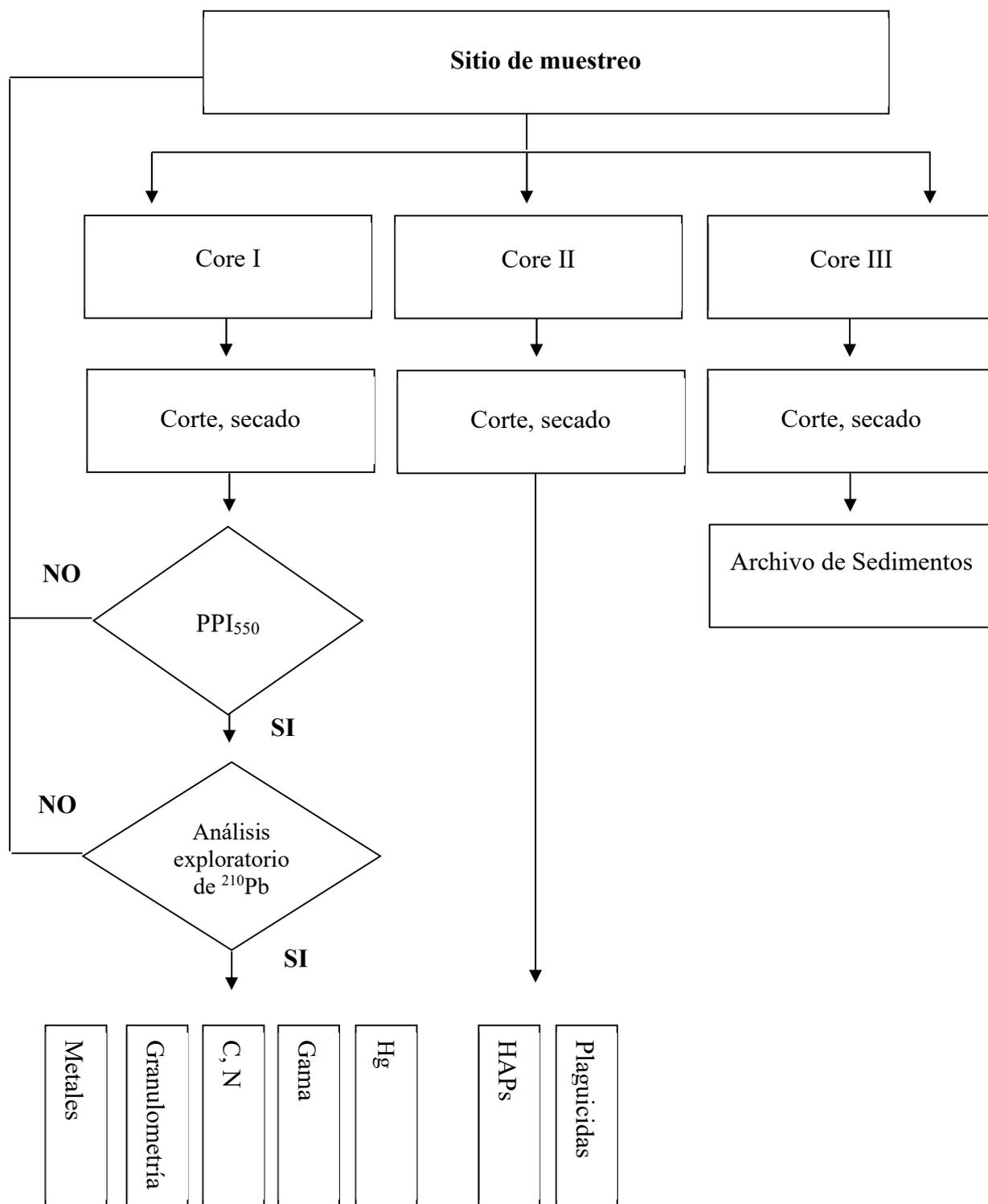


FIG. 2: Diagrama de flujo del mecanismo del procesamiento de muestras.

### **8.1.1. Contenido de humedad**

Se utiliza para calcular la porosidad y la densidad in situ del sedimento, variables relacionadas con la compactación de los sedimentos, factor que puede afectar la exactitud del fechado  $^{210}\text{Pb}$ , debido a la reducción del espesor de los intervalos de los cores debido al enterramiento. El valor del peso seco total de las secciones del core, que se obtiene durante la estimación de la humedad, y el valor del volumen de cada sección, se utilizarán para estimar de una manera precisa y directa la profundidad másica ( $\text{g cm}^{-2}$ ), que es un parámetro fundamental en el fechado con  $^{210}\text{Pb}$ , indispensable para compensar los efectos de la compactación en los perfiles de  $^{210}\text{Pb}$  y los contaminantes [5].

### **8.1.2. Pérdidas por ignición**

Provee una estimación del contenido de materia orgánica en los sedimentos. Aunque se sabe que normalmente sobreestima los valores de materia orgánica debido a la pérdida de agua estructural en minerales arcillosos, es una técnica simple y barata que permite conocer rápidamente los perfiles de concentración de materia orgánica respecto a la profundidad en los cores, los cuales serán utilizados como índices preliminares para identificar los cores seleccionados para el fechado con  $^{210}\text{Pb}$ .

La importancia del análisis de  $\text{PPI}_{550}$  en la estrategia de trabajo de este proyecto está basada en tres observaciones empíricas: (a) la disponibilidad de materia orgánica suspendida en la columna de agua es uno de los factores principales que regulan el flujo de  $^{210}\text{Pb}$  hacia los sedimentos; (b) la materia orgánica enterrada en los sedimentos se descompone debido a la acción bacteriana; (c) con el paso del tiempo, las concentraciones de la materia orgánica disminuyen debido a la mineralización, las actividades de  $^{210}\text{Pb}$  debido a la desintegración radioactiva, y ambas magnitudes muestran tendencias exponenciales con la profundidad en sedimentos inalterados [7]. Se considera entonces que, si los perfiles de  $\text{PPI}_{550}$  respecto a la profundidad muestran una tendencia exponencial con la profundidad, probablemente la perturbación de los sedimentos es mínima, y por tanto, estos cores tendrían mayores posibilidades de proveer perfiles de  $^{210}\text{Pb}$  útiles para propósitos de fechado.

### **8.1.3. Distribución de tamaño de grano**

Permite conocer el contenido porcentual de las tres fracciones principales de tamaño de grano (arenas, limos y arcillas) y es útil tanto para explicar desde los valores atípicos de  $^{210}\text{Pb}$  en caso de perfiles anómalos (diferentes al decaimiento exponencial) como para normalizar los valores de metales pesados. En el Anexo III (en archivos suplementarios) se presentan las recomendaciones para la preparación de las muestras para el análisis del tamaño de grano.

### **8.1.4. Composición elemental**

Este análisis nos permite conocer las concentraciones de elementos indicadores de procesos diagenéticos en la columna sedimentaria (Fe, Mn), del aporte de material terrígeno a los sedimentos (Al, Ti) y de metales contaminantes tales como As, Cd, Hg, Cu, V, Pb y Zn.

### **8.1.5. Carbono total, nitrógeno total, carbono inorgánico total y carbono orgánico total**

El análisis de la concentración y flujos de C y N es útil para identificar el proceso de enriquecimiento de los cuerpos de agua por nutrientes (tendencias de eutrofización) y para evaluar la procedencia de la materia orgánica presente en los sedimentos (a partir del cálculo de las proporciones C/N).

### **8.1.6. $^{210}\text{Pb}$**

Es uno de los trazadores radiactivos utilizados para obtener la geocronología de los cores sedimentarios. En el proyecto RLA7/012 la actividad de  $^{210}\text{Pb}$  se estimó por espectrometría alfa, a través de la determinación de  $^{210}\text{Po}$ , bajo la suposición de equilibrio radiactivo entre ellos. En el Anexo III (en archivos suplementarios) se describe el método analítico [9], adaptado de [10].

### **8.1.7. $^{226}\text{Ra}$ y $^{137}\text{Cs}$ por espectrometría de rayos gamma**

El método de fechado por  $^{210}\text{Pb}$  requiere de la determinación de  $^{226}\text{Ra}$  y de la corroboración de fechas utilizando al radionúclido artificial  $^{137}\text{Cs}$ . Las determinaciones de ambos radionúclidos pueden ser realizada por espectrometría gamma de alta resolución y bajo fondo.

### **8.1.8. Mercurio total**

El mercurio total se puede cuantificar utilizando Analizadores Directos de Mercurio (AMA) siguiendo el método de referencia USEPA [11].

### **8.1.9. Hidrocarburos aromáticos policíclicos**

Los análisis de HAPs se pueden realizar por el método de cromatografía de gases (GC–FID o GC–MS) dependiendo de las capacidades de cada laboratorio.

### **8.1.10. Plaguicidas (hidrocarburos organoclorados)**

Los análisis de plaguicidas pueden ser realizados por cromatografía de gases (GC–ECD).

## **8.2. ANÁLISIS OPCIONALES**

### **8.2.1. Temperatura y salinidad**

Estas mediciones sirven para caracterizar el ambiente en la zona de interés. Sus valores se determinan utilizando una sonda multiparamétrica.

### **8.2.2. Oxígeno disuelto**

La determinación de este parámetro servirá para reconocer el grado de oxigenación de las aguas de fondo, con lo cual se podría entender mejor los perfiles de metales redox–sensibles tales como Fe, Mn y/o Cd. Sus valores se determinan utilizando una sonda multiparamétrica.

### 8.2.3. Composición mineralógica

Provee información acerca de los componentes minerales mayoritarios en el sedimento, por ejemplo, la distribución de minerales arcillosos, para identificar la procedencia de los sedimentos. Se realiza por el método de difracción de rayos X.

### 8.3. CONTROL DE CALIDAD ANALÍTICO

Los laboratorios deberán analizar rutinariamente muestras por duplicado, blancos de reactivo y materiales de referencia certificados. Es importante la participación de los laboratorios en ejercicios de intercalibración y de intercomparación.

Asimismo, se recomienda a los laboratorios que, para obtener la mayor reproducibilidad de los resultados, se aplique el mismo procedimiento analítico a todas las muestras analizadas (incluyendo blancos, duplicados, etc.).

CUADRO 2. MÉTODOS DE ANÁLISIS Y ALÍCUOTAS REQUERIDAS

Análisis	Unidad	Método	Código	Mínimo (g)	Optimo (g)
<i>Core I: Radionúclidos, metales y parámetros geoquímicos</i>					
Humedad	%	Estufa (45 °C)	HUM	–	Total
Pérdidas por ignición	%	Mufla (550 °C)	PPI	0.5	0.5
C, N	%	Analizador elemental	C–N	1.0	1.5
Metales	%	Fluorescencia rayos–X	XRF	4.0	5.0
<sup>210</sup> Pb, <sup>137</sup> Cs	Bq kg <sup>-1</sup>	Gama espectrometría	GAM	20	25
<sup>210</sup> Pb ( <sup>210</sup> Po)	Bq kg <sup>-1</sup>	Alfa espectrometría	ALF	0.5	1.0
Tamaño de grano	%	Difracción rayos láser	GRA	1.0	2.0
<i>Core II: Compuestos orgánicos</i>					
HAPs	mg kg <sup>-1</sup>	GC–FID, GC–MS	HAP	5	10
Plaguicidas	mg kg <sup>-1</sup>	GC–ECD	PLA	5	10
Mercurio	mg kg <sup>-1</sup>	AMA	AMA	0.5	2.0
<i>Análisis opcionales</i>					
Temperatura agua	°C	Sonda	T	–	–
Salinidad del agua	–	Sonda	S	–	–
Oxígeno disuelto	mg L <sup>-1</sup>	Sonda	OD	–	–

## REFERENCIAS

- [1] GOLDBERG, E.D., "Geochronology with  $^{210}\text{Pb}$ ", Proceedings of the Symposium on Radioactive Dating, Athens (1962), International Atomic Energy Agency, Vienna (1963).
- [2] AXELSSON, V., EL-DAOUSHY, F., Sedimentation in the Edsviken bay studied by the X-ray and the Pb-210 methods, *Geogr. Ann. A*, **71** 1/2 (1989) 87-93.
- [3] VALETTE-SILVER N., The use of sediment cores to reconstruct historical trends in contamination of estuarine and coastal sediments, *Estuaries* **16** (1993) 577-588.
- [4] KRISHNASWAMI, S., LAL, D., MARTIN, J., MEYBECK, M., Geochronology of lake sediments, *Earth Planet. Sc. Lett.* **11** (1971) 407-414.
- [5] SANCHEZ-CABEZA, J. A., RUIZ-FERNÁNDEZ, A. C., Modelos de fechado por  $^{210}\text{Pb}$ ", *Radiocronología de sedimentos costeros utilizando  $^{210}\text{Pb}$ : modelos, validación y aplicaciones*. Organismo Internacional de Energía Atómica, Viena (2012).
- [6] DEAN, W. E., Jr., Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition: comparison with other methods, *J. Sediment. Petrol.* **44** (1974) 242-248.
- [7] RUIZ-FERNANDEZ, A.C., SANCHEZ-CABEZA, J.A., ALONSO-HERNÁNDEZ, C., MARTÍNEZ-HERRERA, V., PÉREZ-BERNAL, L.H., PREDÁ, M., HILLAIRES-MARCEL, C., GASTAUD, J., QUEJIDO-CABEZAS, A.J., Effects of land use change and sediment mobilization on coastal contamination (Coatzacoalcos River, Mexico), *Cont. Shelf Res.* **37** (2012) 57-65.
- [8] BERNER, R. A., Early diagenesis: A theoretical approach, Princeton Series in Geochemistry, Princeton University Press, Princeton (1980).
- [9] RUIZ-FERNÁNDEZ, A.C., HILLAIRES-MARCEL, C.,  $^{210}\text{Pb}$ -derived ages for the reconstruction of terrestrial contaminant history into the Mexican Pacific coast: Potential and limitations, *Mar. Pollut. Bull.* **59** (2009) 134-145.
- [10] FLYNN, W.W., The determination of low levels of polonium-210 in environmental materials, *Anal. Chim. Acta* **43** (1968) 221-227.
- [11] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, Mercury in solids and solutions by thermal decomposition, amalgamation and atomic absorption spectrometry, Method 7473 (1998), <http://www.epa.gov/sw-846/pdfs/7473.pdf>

## COLABORADORES EN LA REDACCIÓN Y REVISIÓN

Alonso-Hernández, C. M.	Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos, Cuba
Beltrán González, J.M.	Centro de Ingeniería y Manejo Ambiental de Bahías y Costas, Cuba
Quezada William, V.D.	Centro de Investigación de los Recursos Acuáticos de Nicaragua, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua.
Díaz-Asencio, M.	Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos, Cuba
Fermin Mieres, I.	Instituto de Oceanografía, Universidad del Oriente, República Bolivariana de Venezuela.
Fernández, J. M.	Institut de Recherche pour le Développement, Nueva Caledonia, Francia.
González, M.	Instituto de Oceanografía, Universidad del Oriente, República Bolivariana de Venezuela.
López Monroy, F.	Instituto de Oceanografía, Universidad del Oriente, República Bolivariana de Venezuela.
Márquez, A.	Instituto de Oceanografía, Universidad del Oriente, República Bolivariana de Venezuela.
Martínez Herrera, V.M.	Centro de Investigación de los Recursos Acuáticos de Nicaragua, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua.
Mostue de Crescente, M.B.	Instituto de Oceanografía, Universidad del Oriente, República Bolivariana de Venezuela.
Quejido Cabezas, A.	Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, España.
Ramírez Rojas, A.J.	Instituto de Oceanografía, Universidad del Oriente, República Bolivariana de Venezuela.
Ruiz-Fernández, A.C. (Editor)	Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, México
Sanchez-Cabeza, J.A. (Editor)	Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, México
Senior Galindo, W.	Instituto de Oceanografía, Universidad del Oriente, República Bolivariana de Venezuela.
Sericano, J.	Texas A&M University, Estados Unidos de América.
Tolosa, I. (Revisora)	Organismo Internacional de la Energía Atómica, Laboratorios del Medio Marino, Mónaco

### EVENTOS REGIONALES PARA LA PREPARACIÓN DE ESTA PUBLICACIÓN

Taller regional para la elaboración de procedimientos y métodos de referencias para desarrollar el proyecto RLA/7/012

Instituto de Oceanografía, Universidad del Oriente, Cumaná, República Bolivariana de Venezuela, 14-18 de mayo de 2007.

Curso regional sobre la aplicación de técnicas nucleares en la solución de problemas específicos del manejo integrado de zonas costeras del Caribe.

Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos, Cuba, 10-21 de septiembre de 2007.

Los archivos suplementarios de esta publicación pueden encontrarse en su página individual, en: [www.iaea.org/publications](http://www.iaea.org/publications)

## ANEXO I: PLANILLAS DE RECOLECCIÓN DE MUESTRAS DE SEDIMENTO

- I.1. Planilla de recolección de sedimentos superficiales
- I.2. Planilla de recolección de cores de sedimentos
- I.3. Planilla de caracterización de los cores

## ANEXO II: INFORMES ANALÍTICOS

- II.1. Preparación de informes de resultados analíticos
- II.2. Ejemplo de informe analítico

## ANEXO III: MÉTODOS DE ANÁLISIS

- III.1. Contenido de humedad en el sedimento
- III.2. Pérdidas por ignición
- III.3. Preparación de muestras para análisis de actividad de  $^{210}\text{Po}$  en sedimentos
- III.4. Actividad de radionúclidos por espectrometría de rayos gamma
- III.5. Preparación de muestras para análisis de tamaño de grano
- III.6. Composición elemental por espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRF)
- III.7. Determinación de carbono total, nitrógeno total, carbono inorgánico total y carbono orgánico total
- III.8. Concentración de mercurio total en sedimentos
- III.9. Contaminantes orgánicos en sedimentos
- III.10. Factores de normalización para metales y metaloides



# IAEA

Organismo Internacional de Energía Atómica

Nº 26

## PEDIDOS DE PUBLICACIONES

Las publicaciones de pago del OIEA pueden adquirirse a través de los proveedores que se indican a continuación o en las principales librerías locales.

Los pedidos de publicaciones gratuitas deben hacerse directamente al OIEA. Al final de la lista de proveedores se proporcionan los datos de contacto.

### AMÉRICA DEL NORTE

#### ***Bernan / Rowman & Littlefield***

15250 NBN Way, Blue Ridge Summit, PA 17214, EE. UU.

Teléfono: +1 800 462 6420 • Fax: +1 800 338 4550

Correo electrónico: [order@renoufbooks.com](mailto:order@renoufbooks.com) • Sitio web: [www.renoufbooks.com](http://www.renoufbooks.com)

### RESTO DEL MUNDO

Póngase en contacto con su proveedor local de preferencia o con nuestro distribuidor principal:

#### ***Eurospan Group***

Gray's Inn House

127 Clerkenwell Road

Londres EC1R 5DB

Reino Unido

#### ***Pedidos comerciales y consultas:***

Teléfono: +44 (0)176 760 4972 • Fax: +44 (0)176 760 1640

Correo electrónico: [euroman@turpin-distribution.com](mailto:euroman@turpin-distribution.com)

#### ***Pedidos individuales:***

[www.eurospanbookstore.com/iaea](http://www.eurospanbookstore.com/iaea)

#### ***Para más información:***

Teléfono: +44 (0)207 240 0856 • Fax: +44 (0)207 379 0609

Correo electrónico: [info@eurospangroup.com](mailto:info@eurospangroup.com) • Sitio web: [www.eurospangroup.com](http://www.eurospangroup.com)

### Los pedidos de publicaciones, tanto de pago como gratuitas, pueden enviarse directamente a:

Dependencia de Mercadotecnia y Venta

Organismo Internacional de Energía Atómica

Vienna International Centre, PO Box 100, 1400 Vienna, Austria

Teléfono: +43 1 2600 22529 o 22530 • Fax: +43 1 26007 22529

Correo electrónico: [sales.publications@iaea.org](mailto:sales.publications@iaea.org) • Sitio web: [www.iaea.org/publications](http://www.iaea.org/publications)

**Organismo Internacional de Energía Atómica  
Viena**