



Recuperación Natural Monitorizada

Apellidos, nombre	Pachés Giner, Maria AV ¹ (mapacgi@upvnet.upv.es) Greses Huerta, Silvia ² (silvia.greses@uv.es)
Departamento	¹ Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente ² Departamento de Ingeniería Química (Universitat de València)
Centro	Universitat Politècnica de València



1 Resumen de las ideas clave

Los sedimentos contaminados generan un grave riesgo para la salud de las personas y el medio ambiente que debe ser gestionado correctamente. Si la toxicidad y biodisponibilidad de los contaminantes presente en ellos fuera uniforme se podrían clasificar, regular y gestionar en función de su concentración, de forma similar a como se aborda la gestión de la contaminación en otros medios como el agua o el aire. Sin embargo, en los sedimentos existen varios factores que pueden aumentar o disminuir la disponibilidad y toxicidad de los contaminantes. Por tanto, no solo se debe tener en cuenta la concentración de contaminantes, sino también las vías de exposición que generan riesgo para la salud humana y el medio ambiente.

La minimización de estos riesgos para los receptores humanos y ecológicos se puede conseguir mediante la Recuperación Natural Monitorizada (RNM). Esta tecnología constituye una alternativa de gestión mediante la cual, los procesos físicos, químicos y biológicos como la transformación, difusión, adsorción, volatilización o aislamiento que actúan conjuntamente de forma natural en los sedimentos, pueden reducir la exposición o toxicidad de los contaminantes.

La RNM es adecuada cuando se puede demostrar que se consiguen lograr los objetivos de reducción de la contaminación de un sitio dentro de un período de tiempo razonable en comparación con otras alternativas de gestión. Además, para aumentar el grado de recuperación y efectividad, puede combinarse con otras medidas de remediación en sedimentos.

2 Objetivos

Una vez que leas con detenimiento este documento, serás capaz de:

- Definir en qué consiste la tecnología de la Recuperación Natural Monitorizada
- Describir el procedimiento para llevar a cabo una Recuperación Natural Monitorizada
- Identificar los procesos principales que se dan en la Recuperación Natural Monitorizada
- Enumerar las ventajas e inconvenientes de esta tecnología y las principales líneas de evidencia

3 Introducción

La gestión de sedimentos contaminados persigue como objetivo principal la reducción del riesgo ecológico y para la salud humana a largo plazo. En entornos acuáticos afectados por sedimentos contaminados, las estrategias de gestión se centran en eliminar el material contaminado o en interrumpir las vías de exposición por las cuales los contaminantes suponen un riesgo para la salud o el medio ambiente. Tanto la eliminación del material como la interrupción de las vías se logra generalmente mediante dragado ambiental, aislamiento



in situ de las áreas contaminadas (cobertura) o por Recuperación Natural Monitoreada (RNM). El dragado y/o la cobertura pueden ser tecnologías económicamente costosas y tener un impacto ambiental considerable al afectar significativamente a la calidad del agua superficial y el hábitat acuático (Magar et al., 2009). Por ello, la RNM se presenta como una alternativa aceptable que se puede combinar con otros enfoques para aumentar las garantías de éxito.

La RNM es definida como una práctica que confía en procesos naturales no mejorados para proteger a los receptores humanos y ambientales de exposiciones inaceptables a contaminantes (NRC 2000). Es una alternativa de gestión de espacios contaminados que utiliza los procesos naturales que se dan en los sedimentos para contener, destruir o reducir la biodisponibilidad o toxicidad de los contaminantes. La RNM implica dejar los sedimentos en su lugar, ejercer un control exhaustivo de la fuente y permitir que los procesos sedimentarios y biológicos en curso minimicen los riesgos ambientales.

Es importante recalcar que la decisión de implementar una RNM en un lugar contaminado no significa no hacer nada para la remediación. La RNM es el resultado de un proceso de toma de decisiones en el que se requiere un profundo conocimiento de los procesos naturales subyacentes (caracterización del sitio), una evaluación extensa del riesgo, un control y monitoreo de la fuente, un modelado predictivo, un establecimiento de expectativas y la confirmación posterior de que los procesos naturales actúan reduciendo el riesgo con el tiempo según lo establecido.

Los procesos que se dan en los sedimentos actúan de forma natural y están presentes siempre, pero si la recuperación natural programada no logra reducir los riesgos establecidos se pueden tomar medidas adicionales para acelerarla a través de la RNM mejorada o combinando ésta con otras actividades como el dragado, el aislamiento o controles institucionales.

Recuerda que... *No todos los procesos naturales reducen los riesgos. Algunos pueden aumentar o desplazar el riesgo a otras ubicaciones o receptores. Para implementar la RNM con éxito se deben identificar y evaluar aquellos procesos que contribuyen a la reducción de riesgos.*

3.1 Condiciones de aplicación

La implementación exitosa de la RNM depende de una serie de condiciones. En primer lugar, se debe realizar una investigación profunda de la zona a tratar que incluya la evaluación del hidrodinamismo de la zona, la estabilidad del lecho sedimentario, la composición geoquímica y estudios biológicos de la red trófica.

Además, es importante ejercer un control de la fuente de contaminación para garantizar el éxito de la tecnología. La RNM es particularmente sensible al control de la fuente y, por tanto, la falta de comprensión y gestión adecuada de la misma puede comprometer la capacidad para cuantificar los procesos y puede limitar la efectividad en aquellos casos en que las tasas de recuperación natural sean superadas por las liberaciones desde la fuente. Esto no quiere decir que la eliminación de todas las fuentes sea un requisito previo de la

RNM, sino que el equilibrio entre las fuentes y los procesos de recuperación natural debe entenderse lo suficientemente bien como para asegurar que se darán las reducciones de riesgo esperadas con el tiempo. En aquellos casos en los que los sedimentos reciben aportes químicos de múltiples fuentes, es probable que se requiera un enfoque de gestión a escala regional (cuenca).

En tercer lugar, es necesario desarrollar un modelo conceptual del lugar (*CSM conceptual site model*) que identifique y describa el destino, el transporte químico y los riesgos para la salud humana y el medio ambiente (Imagen 1). Estos modelos constituyen la base para poder desarrollar e implementar posteriormente modelos numéricos específicos del sitio. Estos modelos permiten por una parte cuantificar los procesos descritos anteriormente y por otra realizar estimaciones del tiempo requerido para alcanzar los estándares de referencia o los niveles de riesgo aceptables.

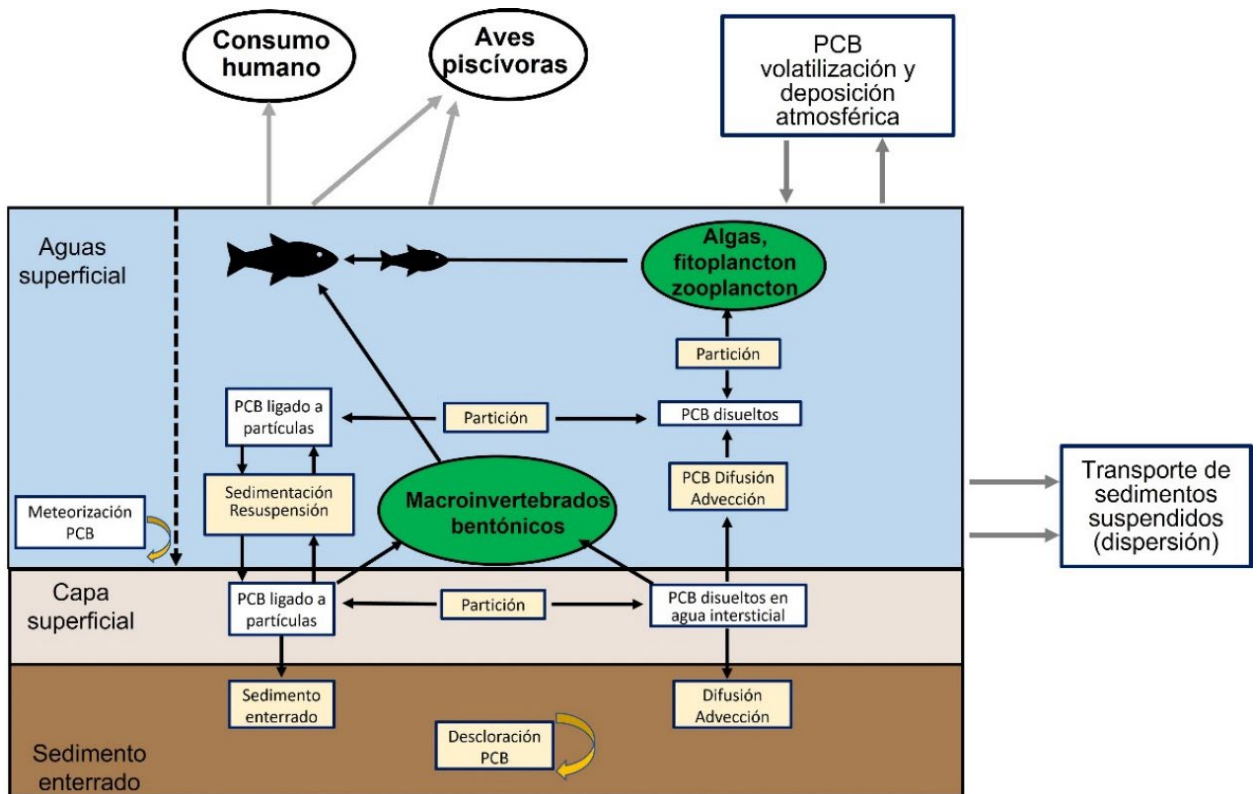


Imagen 1. Ejemplo de un Modelo Conceptual del Sitio (adaptado de Magar et al., 2009).

Por último, el monitoreo a largo plazo es fundamental para verificar si la reducción de riesgos y la recuperación ecológica por procesos naturales está ocurriendo de manera efectiva. Cabe señalar que tanto las investigaciones para caracterizar el lugar, como las actividades de monitoreo a largo plazo, pueden ser más costosas económicamente que el resto de alternativas de gestión (cobertura o dragado). Sin embargo, no hay costes asociados a la construcción de ninguna infraestructura.

A continuación, se muestra una tabla con las principales ventajas e inconvenientes de esta tecnología de gestión de sedimentos contaminados.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• Menor generación o transferencia de residuos.• Menos intrusivo y perturbador que otros métodos.• Puede ser aplicada a un sitio completo o a parte de él, según los objetivos de remediación que se quieran alcanzar.• Pueden ser combinados con tratamientos activos de remediación.• Los costos de remediación son menores a los de una remediación activa.	<ul style="list-style-type: none">• Requiere mayores tiempos de remediación para alcanzar los objetivos.• Se requiere un monitoreo regular y a largo plazo que puede llevar asociado costos excesivos.• No es apropiada en caso de riesgo inminente por contaminación.• Si las tasas de atenuación natural son demasiado bajas, la pluma puede continuar migrando.• La biodegradación incompleta puede generar productos secundarios aún más móviles y tóxicos que el compuesto parental.• Usualmente es requerido el control de uso de suelo y de aguas subterráneas.

Tabla 1. Características de los objetos de aprendizaje (EPA, 1999).

4 Procesos Naturales de Recuperación

Los procesos naturales que se dan en los sedimentos y contribuyen a la reducción de riesgos en la RNM se pueden dividir en cuatro categorías principalmente (EPA, 2005):

- **Transformación química:** Los contaminantes pueden convertirse en formas menos tóxicas a través de procesos de transformación biótica y abiótica. La transformación de compuestos orgánicos ocurre cuando se rompen los enlaces covalentes, lo que resulta en la aparición de nuevos compuestos químicos o en la mineralización completa del compuesto a sus elementos básicos (CO_2 , H_2O , Cl^-). Esta transformación ocurre a través de mecanismos bióticos como el metabolismo celular o mecanismos abióticos como cambios en las condiciones fisicoquímicas (pH o condiciones de oxidación-reducción) (Magar et al., 2005). Algunos ejemplos de procesos de transformación de contaminantes orgánicos son la descloración parcial mediada por microorganismos de PCBs, solventes clorados y otros hidrocarburos clorados, o la biodegradación oxidativa de hidrocarburos de petróleo, incluidos algunos PAHs, y compuestos como nitrotolueno.

La transformación de compuestos inorgánicos ocurre por cambios en los estados de valencia y en los enlaces químicos, lo que a su vez afecta a la movilidad, toxicidad y biodisponibilidad. Las variables ambientales que regulan dichas características son el pH, la alcalinidad del agua intersticial, el tamaño de grano del sedimento, las condiciones de oxidación-reducción y la cantidad de sulfuros y carbono orgánico en los sedimentos. Por



último, algunas transformaciones químicas de metales también pueden ser mediadas biológicamente.

- **Reducción de la movilidad y biodisponibilidad de contaminantes:** La sorción y la precipitación de metales reducen la movilidad y la biodisponibilidad de los contaminantes. Esta reducción es debida al transporte químico de los contaminantes que migran entre las fases sólidas, acuosas y biológicas. Dentro del lecho de sedimentos, la movilidad implica el transporte químico entre sedimento y agua intersticial y entre sedimento/agua intersticial y biota. En la columna de agua, la movilidad implica el transporte químico entre sedimentos suspendidos y agua superficial y entre sedimentos suspendidos/agua superficial y biota.

La movilidad y la biodisponibilidad están interconectadas, de modo que los aumentos o disminuciones en la movilidad tienden a correlacionarse con aumentos o disminuciones en la biodisponibilidad de contaminantes. La precipitación de compuestos reduce la solubilidad, la movilidad y la biodisponibilidad del contaminante (por ejemplo la precipitación de hidróxidos y sulfuros de metales divalentes, precipitación de hidróxidos de Cr(III), y la coalescencia de hidrocarburos aromáticos policíclicos de alto peso molecular en líquidos en fase no acuosa).

En contaminantes orgánicos la movilidad está condicionada por la hidrofobicidad específica del compuesto (coeficiente de partición octanol-agua- K_{ow}), la matriz sorbente, la concentración química y las cinéticas de desorción. Para los precipitados en fase sólida, las propiedades químicas que determinan la movilidad son el producto de solubilidad específico del compuesto (K_{sp}), la temperatura, pH, alcalinidad, condiciones de oxidación-reducción y las concentraciones químicas.

- **Aislamiento físico:** Muchos contaminantes que permanecen en los sedimentos no pueden ser transformados químicamente de forma fácil. Por esta razón, el aislamiento físico de los mismos por sedimentación natural puede ser una opción aceptable para reducir los riesgos. La sedimentación natural de material limpio produce un aislamiento de los contaminantes por enterramiento. Este mecanismo de aislamiento favorece que se den una serie de procesos de mezcla que contribuyen a la dilución de los contaminantes y reduce su potencial de exposición, pudiendo alcanzar, a largo plazo, los niveles de limpieza de sedimentos superficiales (Brenner et al., 2004).

Esta sedimentación es el resultado de la erosión de partículas producida en la cuenca, la precipitación de sólidos en la columna de agua y la acumulación de restos biológicos que sucede en ambientes netamente deposicionales (tasa de deposición de sedimentos excede la tasa de arrastre de sedimentos). Resulta paradójico que los mecanismos naturales de transporte de sedimentos que pueden ayudar a disminuir la contaminación en un momento determinado, son los mismos que causaron la deposición y acumulación inicial de partículas contaminadas. Esto evidencia que el control de las fuentes de contaminación es un elemento clave en las alternativas de gestión de sedimentos contaminados, especialmente para la RNM.

- **Dispersión:** La dispersión abarca una variedad de procesos naturales como la resuspensión física del sedimento, el movimiento de compuestos químicos disueltos a través de corrientes de agua superficial, la advección del agua subterránea y la difusión química. Todos estos procesos que rara vez suceden de forma aislada, tienden a mover la contaminación de zonas de mayor a menor concentración dando como resultado



exposiciones de contaminación en áreas más amplias, aunque en concentraciones más bajas.

La dispersión debe ser evaluada detalladamente para poder asegurar la efectividad de la RNM puesto que está activa en casi todos los sitios y muestra efectos directos, propios de la exposición de los contaminantes, e indirectos al influir en otros mecanismos de recuperación natural.

A continuación, se muestran las principales consideraciones específicas del sitio para cada uno de los procesos descritos anteriormente.

Procesos de recuperación	Consideraciones específicas del sitio
Procesos de Transformación	<p>Los sedimentos anóxicos favorecen la reducción de metales como el Cr, disminuyendo su biodisponibilidad y toxicidad.</p> <p>La movilidad y toxicidad de los metales divalentes tiende a disminuir con el aumento del pH y las concentraciones de sulfuro y carbono orgánico.</p> <p>Las condiciones de oxidación-reducción propicias para la reducción de sulfato favorecen la formación de metilmercurio, aunque altas concentraciones de sulfuro pueden inhibir la metilación. El metilmercurio es más tóxico y biodisponible que el mercurio inorgánico.</p> <p>Temperaturas cálidas y las altas concentraciones de carbono fomentan la transformación por microorganismos.</p>
Reducción de la movilidad y biodisponibilidad	<p>Sedimentos con altas concentraciones de carbono orgánico son propicios para la absorción de contaminantes y, en cierta medida, de metales divalentes.</p> <p>Sedimentos con altas concentraciones de arcilla son propicios para la absorción de metales.</p> <p>Sedimentos con bajo contenido de oxígeno y/o altos niveles de sólidos disueltos (alta salinidad, dureza o sulfuros) favorecen la precipitación de minerales de metal de baja solubilidad.</p>
Aislamiento físico	<p>La bioturbación y la mezcla hidrodinámica afectan al contenido de contaminantes en el sedimento superficial y a la tasa de aislamiento.</p> <p>El As y Hg exhiben un ciclo vertical debido al cambio de condiciones de oxidación-reducción en los límites</p>



	del sedimento y la formación de complejos con óxidos de Fe en el sedimento oxigenado.
Dispersión	En el transporte de agua subterránea aeróbica, los metales divalentes son solubles y móviles. Condiciones reductoras (precipitación) provocan acumulación en el sedimento. Condiciones aeróbicas favorecen la reducción de contaminantes por difusión, transporte por advección, adsorción y precipitación.

Tabla 2. Consideraciones específicas del sitio para los principales procesos (EPA, 2005).

4.1 Líneas de evidencia para la Recuperación Natural Monitorizada

Existe una amplia variedad de herramientas para evaluar la permanencia y la velocidad de los procesos de recuperación natural y su relación con las reducciones en la exposición y el riesgo (Magar et al., 2006). Algunas de estas herramientas requieren de:

- Medir las concentraciones de contaminantes en el sedimento superficial, en el agua intersticial o en tejidos a lo largo del tiempo para establecer cambios en función del tiempo en la química, exposiciones y riesgos.
- Realizar evaluaciones de toxicidad del sedimento y/o composición de la comunidad bentónica a lo largo del tiempo.
- Cuantificar la recuperación de poblaciones de peces y vida silvestre a lo largo del tiempo, si los efectos que generan los contaminantes sobre estas especies son determinantes para la recuperación.
- Medir perfiles verticales de concentración de contaminantes en núcleos de sedimento para documentar cambios históricos en las concentraciones del sedimento superficial y correlacionar esos cambios con las tendencias temporales en los receptores biológicos.
- Identificar las posibles fuentes de fondo o externas que puedan continuar y, por lo tanto, ralentizar la recuperación.
- Medir contaminantes en los puntos de entrada a los sedimentos, aguas arriba, emisarios y otras fuentes puntuales o no puntuales.
- Modelar el balance de masa de contaminantes para determinar si las fuentes conocidas (por ejemplo, emisarios de aguas pluviales, agua subterránea, contaminación de sedimentos) explican las concentraciones observadas en tejidos bióticos.

5 Recuperación ecológica

La recuperación ecológica de un lugar afectado por contaminación es un proceso lento y más difícil de cuantificar que estimar la recuperación del propio sedimento.

La recuperación ecológica de áreas contaminadas por compuestos no bioacumulativos es más fácil de monitorear y cuantificar, porque el objetivo está en la reducción de la toxicidad aguda. Sin embargo, para compuestos químicos bioacumulativos, las relativamente largas



esperanzas de vida de algunos peces y la capacidad para buscar alimento en áreas extensas pueden dificultar la cuantificación de la recuperación si se utilizan datos de peces.

Los aumentos o disminuciones en biota de niveles tróficos superiores no necesariamente indican cambios en la concentración de contaminantes de los sedimentos superficiales, sino que más bien puede indicar cambios en las vías de exposiciones o cargas ambientales no relacionadas con los sedimentos (Fisk et al., 2001). Por tanto, la reducción de los contaminantes mediada por la RNM no siempre tiene un reflejo inmediato en la concentración de contaminantes en los seres vivos, puesto que estas tendencias pueden estar enmascaradas por otros factores como la carga dietética, la edad, sexo o tamaño de la especie.

Por todo ello, la medición de cambios en la concentración de contaminantes en puntos finales de la red trófica es uno de los mayores desafíos para la implementación, regulación y aceptación pública de la RNM.

6 Cierre

A lo largo de este artículo hemos visto que la RNM es una alternativa de gestión de sedimentos contaminados que implica el control de la fuente de contaminación, la investigación del sitio, el desarrollo de modelos conceptual del sitio y el monitoreo a largo plazo.

Se han descrito los procesos naturales de transformación, reducción de la movilidad y biodisponibilidad, aislamiento y dispersión que se dan en los sedimentos por que juegan un papel significativo en la RNM. Además, se han relacionado estos procesos con las condiciones específicas de sitio. Por último, se han identificado las principales ventajas e inconvenientes de esta tecnología y se ha relacionado el concepto de RNM y recuperación ecológica.

7 Bibliografía

Brenner RC, Magar VS, Ickes JA, Foote EA, Abbott JE, Bingler LS, Creclius EA. 2004. Long-term recovery of PCB contaminated surface sediments at the Sangamo-Weston/Twelvemile Creek/Lake Hartwell Superfund site. *Environ Sci Technol* 38:2328–2337.

Environmental Protection Agency (EPA). 2005. Contaminated sediment remediation guidance for hazardous waste sites. Washington DC: Office of Solid Waste and Emergency Response (OSWER). OSWER Directive 9355.0–85.

Environmental Protection Agency (EPA). 1999. Use of Monitored Natural Attenuation at superficial, RCRA corrective Action, and Underground Storage Tank Sites. Osver Directive. Office of Solid Waste and Emergency Response.

Fisk AT, Hobson KA, Norstrom RJ. 2001. Influence of chemical and biological factors on trophic transfer of persistent organic pollutants in the Northwater Polynya marine food web. *Environ Sci Engin* 35:732–738.

Magar V, Chadwick DB, Bridges TS, Fuchsman PC, Conder JM, Steevens JA, Gustavson KE, Mills M.A. 2009. Technical Guide. Monitored Natural Recovery at Contaminated Sediments Sites. ESTCP Project ER-0622.



Magar VS, Brenner RC, Johnson G, Quensen JF. III. 2005. Long-term recovery of PCB-contaminated sediments at the Lake Hartwell Superfund Site: PCB dechlorination II—Rates and extent. *Environ Sci Technol* 39:3538–3547.

Magar VS, Wenning RJ 2006. The role of monitored natural recovery in sediment remediation. *Integrated Environmental Assessment and Management: An International Journal*, 2(1), 66-74.

NRC. 2000. *Natural Attenuation for Groundwater Remediation*. National Research Council, National Academy Press: Washington, DC.