

Restauración Ambiental

Carolina Santander M.
9 de noviembre, 2005

¿Qué es restauración ambiental?

Limpieza de un sitio que contenga sustancias tóxicas que representen un peligro para la población con el fin de reducir las exposiciones a niveles tolerables.

¿De qué depende?

La restauración ambiental de un sitio contaminado puede llegar a ser muy costosa y su magnitud dependerá de:

- Características del sitio
- Aspectos legales y normativos
- Disponibilidad de tecnologías adecuadas para tratar el problema

Cuadro resumen

1. Proyecto de restauración ambiental
 1. Estructura del proyecto
 1. Visión global del proyecto
 2. Investigación para la restauración (IR)
 3. Estudio de Viabilidad
 2. Información generada por el proyecto de restauración
2. Estudios de Viabilidad
 1. Establecimiento de los objetivos de protección
 1. Definición de las metas preliminares de restauración (MPR)
 1. Aspectos legales
 2. Desarrollo inicial de las MPR
 3. Cálculo de metas preliminares de restauración
 2. Modificación de MPR. Niveles de restauración
 2. Desarrollo y selección preliminar de alternativas
 1. Unidades de operación
 2. Análisis detallado de alternativas

1. Proyecto de remediación

- Elaboración de un proyecto previo a la restauración ambiental (definición de etapas y estimación costo/beneficio)
 - Trabajo de campo en el sitio contaminado: Caracterización del escenario de exposición
 - Trabajo de laboratorio: Análisis de muestras ambientales y pruebas de tratabilidad
 - Trabajo de gabinete: Obtención y procesamiento información, modelamiento matemático
=> Decisión de intervenir o no el lugar.

Cuadro resumen

1. Proyecto de restauración ambiental
 1. Estructura del proyecto
 1. Visión global del proyecto
 2. Investigación para la restauración (IR)
 3. Estudio de Viabilidad
 2. Información generada por el proyecto de restauración
2. Estudios de Viabilidad
 1. Establecimiento de los objetivos de protección
 1. Definición de las metas preliminares de restauración (MPR)
 1. Aspectos legales
 2. Desarrollo inicial de las MPR
 3. Cálculo de metas preliminares de restauración
 2. Modificación de MPR. Niveles de restauración
 2. Desarrollo y selección preliminar de alternativas
 1. Unidades de operación
 2. Análisis detallado de alternativas

Estructura del proyecto: Visión global del proyecto

Definir, con la información disponible, antes de hacer un trabajo de campo, la investigación y tipo de análisis que se deben realizar en un sitio dado.

- Estimación preliminar de la complejidad del proyecto.
- Desarrollo de un modelo conceptual del sitio: fuentes de contaminación, rutas de exposición, receptores potenciales.
- Identificación de las decisiones que se espera tomar con el fin de:
 1. Definir tipo y cantidad de información que se va a necesitar
 2. Diseñar los estudios que se van a necesitar para recolectar y/o generar esa información.
- Identificación de las actividades de modelaje-sitio-específicas que se harán para asegurarse que la obtención de información esté siempre dirigida a apoyar las actividades de evaluación de riesgos y que se relacionen modelos congruentes con los datos que sean factibles de obtener o generar.

Estructura del proyecto: Investigación para la restauración (IR)

Trabajo que se necesita para producir y/o captar la información relevante para el estudio de caracterización de riesgos.

Pretende sólo captar la información indispensable para determinar si el sitio debe ser intervenido.

Se lleva a cabo la recolección y análisis de muestras de campo de acuerdo al plan desarrollado en el estudio de visión global.

La información recolectada y generada se procesa hasta llegar a la conclusión de la evaluación de riesgos de línea base (ERLB) junto con la realización de las pruebas de tratabilidad.

Estructura del proyecto: Investigación para la restauración (IR)

Los resultados de la ERLB se usan para:

- Documentar la magnitud del riesgo en el sitio y las causas primarias de ese riesgo.
 - Ayudar a determinar si es necesario intervenir en el sitio.
 - Determinar los niveles residuales de tóxicos que se pueden quedar en los sitios.
 - Establecer y modificar las metas preliminares de restauración
 - Establecer las metas definitivas de restauración.
 - Fundamentar la decisión de “no-acción”, cuando sea lo apropiado.
 - Establecer bases de comparación en la evaluación de las distintas alternativas de restauración.
 - Determinar los riesgos esperados durante el proceso de restauración.
- Es la parte del proyecto donde se toma la decisión de intervenir el lugar.

Estructura del proyecto: Estudio de viabilidad (EV)

En el EV se determina la factibilidad técnica y económica de alcanzar el objetivo de la restauración ambiental.

- Establecimiento de los objetivos de la restauración.
- Desarrollo de alternativas de restauración.
- Selección preliminar de las alternativas tecnológicas.
- Análisis detallado de las alternativas seleccionadas.

Cuadro resumen

1. Proyecto de restauración ambiental
 1. Estructura del proyecto
 1. Visión global del proyecto
 2. Investigación para la restauración (IR)
 3. Estudio de Viabilidad
 2. **Información generada por el proyecto de restauración**
2. Estudios de Viabilidad
 1. Establecimiento de los objetivos de protección
 1. Definición de las metas preliminares de restauración (MPR)
 1. Aspectos legales
 2. Desarrollo inicial de las MPR
 3. Cálculo de metas preliminares de restauración
 2. Modificación de MPR. Niveles de restauración
 2. Desarrollo y selección preliminar de alternativas
 1. Unidades de operación
 2. Análisis detallado de alternativas

Información generada por el proyecto de restauración

El proyecto de restauración entrega:

- Evaluación técnica de los peligros que representa un sitio con desechos peligrosos sin control.
- Caracterización de las posibles rutas de exposición.
- Evaluación de las alternativas de restauración (incluyendo las ventajas y desventajas relativas).
- Selección de la alternativa más adecuada, incluyendo el análisis de los criterios de selección.

Cuadro resumen

1. Proyecto de restauración ambiental
 1. Estructura del proyecto
 1. Visión global del proyecto
 2. Investigación para la restauración (IR)
 3. Estudio de Viabilidad
 2. Información generada por el proyecto de restauración
2. Estudios de Viabilidad
 1. Establecimiento de los objetivos de protección
 1. Definición de las metas preliminares de restauración (MPR)
 1. Aspectos legales
 2. Desarrollo inicial de las MPR
 3. Cálculo de metas preliminares de restauración
 2. Modificación de MPR. Niveles de restauración
 2. Desarrollo y selección preliminar de alternativas
 1. Unidades de operación
 2. Análisis detallado de alternativas

2. Estudios de viabilidad

Los Estudios de Viabilidad (EV) proporcionan una evaluación de las alternativas de restauración, incluyendo el análisis de las debilidades y ventajas de cada una de las tecnologías, así como los criterios utilizados para seleccionar una alternativa sobre las demás.

EV: Establecimiento de los objetivos de protección

Se deben enfocar a los contaminantes y medios de interés en el sitio, a las rutas potenciales de exposición identificadas y a las metas preliminares de restauración que se establecieron.

Objetivos de protección: Definición de las metas preliminares de restauración (MPR)

Las MPR proporcionan los objetivos de largo plazo en el análisis y selección de alternativas de restauración. Estas metas deben diseñarse para:

- Cumplir con los **Requerimientos Aplicables, Relevantes y Apropriados (RARA)**. Los RARA son las concentraciones límites establecidas por las diferentes reglamentaciones ambientales, por ejemplo; los niveles máximos permisibles en agua potable, etc.
- Disminuir los riesgos residuales a niveles que satisfagan los requerimientos de protección de la salud pública.

Objetivos de protección: Definición de las metas preliminares de restauración (MPR)

Las MPR tóxico-específicas son las concentraciones residuales de cada sustancia para cada combinación de medio y uso del suelo. Hay dos fuentes de este tipo de MPR:

- Las concentraciones basadas en los RARA
- Las concentraciones basadas en evaluación de riesgos calculados a partir de los índices de toxicidad y los niveles de exposición.

MPR: Aspectos legales

Los estándares que se deben de llenar en el proceso de restauración están especificados en la legislación ambiental y sus reglamentos. Estos estándares dependen de la regulación de cada país, por ejemplo:

Estados Unidos: CERCLA (ley), NPC (reglamento)

MPR: Desarrollo inicial de las MPR

MPR se deben desarrollar en el estudio de visión global del proyecto de restauración o al inicio del IR/EV.

Esta determinación temprana de las MPR facilita el desarrollo de alternativas tecnológicas y permite que el esfuerzo se centre en la selección del remedio más efectivo.

Para desarrollar las MPR se requiere la siguiente información sobre el sitio:

- Medios potencialmente importantes
- Tóxicos potencialmente importantes
- Usos probables del suelo en el futuro

Una vez que se cuenta con esa información se procede a localizar los RARA. Si no se cuenta con los RARA entonces las MPR se basan en una evaluación preliminar de los riesgos.

Ecuaciones para el cálculo de MPR

Agua potable (uso residencial)

Cancerígenos: $MPR = 365MTR_c / FD(IKS_i + AS_o) = 1.7 \times 10^{-4} / (2S_o + 7.5S_i)$

No cancerígenos: $MPR = 365MTR_{nc} / FD(IKR_i^{-1} + AR_o^{-1}) = 73 / (7.5 R_i^{-1} + 2R_o^{-1})$

Suelo (uso residencial)

Cancerígenos: $MPR = 365TR_c / (A_cFS_o \times 10^{-6}) = 0.64/S_o$

No cancerígenos: $MPR = 365TR_{nc}R_o \times 10^{-6} / FA_c = 2.7 R_o \times 10^5$

Suelo (uso comercial/industrial)

Cancerígenos: $MPR = 365MTR_c / FD ((AS_o \times 10^{-6} + IS_i(K^{-1} + K_p^{-1})))$

$MPR = 2.9 \times 10^{-4} / (5 S_o \times 10^{-6} + S_i (20/K + 4.3 \times 10^{-9}))$

No cancerígenos $MPR = 365MTR_{nc} / FD (A / R_o \times 10^{-6} + (I / R_i) \times (K^{-1} + K_p^{-1}))$

$MPR = 102 / ((5 \times 10^{-9} / R_o) + R_i^{-1} (20K^{-1} + 4.3 \times 10^{-9}))$

Ecuaciones para el cálculo de MPR

Si las MPR para suelo contaminado es mayor que C_{sat} , entonces se usa C_{sat} como MPR.

$$MPR = C_{sat} = sHP_a + sH_f$$

Factor de Volatilización Suelo/Aire $K = 3.14zD^{1/2} LVh / (2ED_{ef}P_a \times 10^{-9}) \underline{Sup}$

Donde: $z = ED_{ef} / (E + P_i^{-1} (1 - E) p_s)$

Factor de Emisión de Partículas: $K_p = VhL \times 10^9 / (1 - c_v)(V_{in}/V) S_{up} F(x)^t$

Tasa Ingesta suelo corregida por la edad: $A_c = (A_{+6} D_{+6} / M_{+6}) + (A_{-6} B_{+6} / M_{+6})$

Parámetros para el cálculo de MPR

| Símbolo | Unidades | Valor | Definición |
|-----------------|---------------------|----------------------|--|
| | | Usual | |
| MPR | mg/L | * | Meta Preliminar de Restauración, igual a C |
| C | mg/L | | Concentración del tóxico |
| Rc | ** | 10 ⁻⁶ | Meta de Riesgo. Exposición a cancerígenos |
| Rnc | ** | 1 | Meta de Riesgo. Exp. a no-cancerígenos |
| M ₊₆ | Kg. | 70 | Masa corporal. Adultos |
| M ₆ | | 15 | Masa corporal. Menores |
| T | año | 70 | Tiempo de exposición (vitalicia) |
| F | días/año | 350 | Frecuencia de exposición. Residencial |
| | | 250 | Frec. de exp. Comercial/Industrial |
| D | año | 30 | Duración de la exposición. Residencial |
| | | 25 | Dur. de la exp. Comercial/Industrial |
| | | 6 | Dur. de la exp. Suelo. Menores de 6 años |
| D ₆ | | 6 | Dur. de la exp. Suelo. Menores de 6 años |
| D ₊₆ | | 24 | Duración de la exposición. Suelo. Mayores |
| S _o | Kg. x día/mg | * | Factor de pendiente. Vía oral |
| S _i | Kg. x día/mg | * | Factor de pendiente. Vía respiratoria |
| R _o | mg/Kg./día | * | Dosis de Referencia. Vía oral |
| R _i | mg/Kg./día | * | Dosis de Referencia. Vía respiratoria |
| I | m ³ /día | 15 | Tasa de inhalación. Residencial (interiores) |
| | | 20 | Tasa de inhalación en el trabajo |
| A | L/día | 2 | Tasa de ingesta de agua |
| A ₆ | mg/día | 200 | T. de ingesta de suelo. Menores de 6 años |
| A ₊₆ | mg/día | 100 | T. de ingesta de suelo. Mayores de 6 años |
| | mg/día | 50 | T. de ingesta de suelo. Comercial/Industrial |
| A _c | mg-año/Kg-día | 114 | T. de ingesta de suelo. Corregida por edad |
| K | ** L/m ³ | 0.5 | Factor de volatilización en agua. |
| | m ³ /Kg. | * | Factor de volatilización. Suelo/aire |
| K _p | m ³ /Kg. | 4.63x10 ⁹ | Factor de emisión de partículas |

* Propiedad de la sustancia.

** Adimensional

Definición de variables para cálculo de las MPR

| Símbolo | Unidades | Valor Usual | Definición |
|-----------|-------------------------|---------------------|--|
| C_{int} | mg/Kg. | *** | Concentración de saturación en suelo |
| C_{org} | Fracción | *** | Contenido de C orgánico en el suelo |
| P_a | L/Kg. | * | Coefficiente de partición suelo/agua |
| P_i | g/cm ³ | 41(Hr/Pa) | Coefficiente de partición suelo/aire |
| P_o | L/Kg. | * | Coefficiente de partición del C orgánico |
| s | mg/L | * | Solubilidad en agua |
| H | L/Kg. | *** | Humedad del suelo |
| H_f | Fracción | *** | Humedad del suelo |
| L | m | 45 | Longitud del área contaminada |
| V | m/s | 2.25 | Veloc. del viento en zona de mezclado |
| h | m | 2 | Altura de difusión |
| S_{up} | m ² | 2025 | Area de contaminación |
| D_{ef} | cm ² /s | $d \times E^{0.53}$ | Difusividad Efectiva |
| d | cm ² /s | * | Difusividad molecular |
| E | ** | *** | Porosidad del suelo |
| H_r | atm-m ² /mol | * | Constante de la ley de Henry |
| p_o | g/cm ³ | 2.65 | Densidad verdadera del suelo |
| T_o | s | 7.9×10^8 | Intervalo de exposición |
| | g x m ² /h | 0.036 | Fracción respirable |
| c_v | ** | 0 | Fracción con cobertura vegetal |
| V_m | m/s | 4.5 | Velocidad media anual del viento |
| V_l | m/s | 12.8 | Velocidad limite a 10m |
| $F(x)$ | ** | 0.0497 | Función que depende de (V_m/V_l) |

* Propiedad de la sustancia

** Adimensional

*** Propiedad del sitio

MPR: Cálculo de metas preliminares de restauración

En este caso se fija el nivel de riesgo y se calcula la concentración del tóxico que produce ese riesgo predeterminado con las mismas ecuaciones anteriores.

Para cancerígenos se fija como meta que el incremento en la probabilidad de que se produzca un cáncer no sea mayor a 1×10^{-6} . Para no-cancerígenos se fija el valor del Índice de Peligro en 1.

Luego, se despeja la concentración y el valor que se obtiene es la Meta Preliminar de Restauración para esa sustancia en ese medio.

Cuadro resumen

1. Proyecto de restauración ambiental
 1. Estructura del proyecto
 1. Visión global del proyecto
 2. Investigación para la restauración (IR)
 3. Estudio de Viabilidad
 2. Información generada por el proyecto de restauración
2. Estudios de Viabilidad
 1. Establecimiento de los objetivos de protección
 1. Definición de las metas preliminares de restauración (MPR)
 1. Aspectos legales
 2. Desarrollo inicial de las MPR
 3. Cálculo de metas preliminares de restauración
 2. **Modificación de MPR. Niveles de restauración**
 2. Desarrollo y selección preliminar de alternativas
 1. Unidades de operación
 2. Análisis detallado de alternativas

Objetivos de protección: Modificación de MPR. Niveles de restauración

Las MPR se van modificando a medida de que se va contando con la información generada en el IR/EV.

Cuando se tienen los resultados de la ERLB se comparan los resultados obtenidos (identificación de los medios y substancias relevantes así como los usos actuales y futuros del suelo) con las suposiciones que se hicieron en el estudio de visión global. Es probable que se tengan que agregar o eliminar substancias a la lista preliminar y que también se tengan que establecer metas diferentes.

Objetivos de protección: Modificación de MPR. Niveles de restauración

Las metas de restauración finales se establecen hasta que se ha llegado a la fase final de selección de la tecnología más apropiada y se les cambia el nombre llamándoseles ahora “niveles de restauración”, para enfatizar el hecho de que son requisitos obligatorios y no sólo metas deseables

Cuadro resumen

1. Proyecto de restauración ambiental
 1. Estructura del proyecto
 1. Visión global del proyecto
 2. Investigación para la restauración (IR)
 3. Estudio de Viabilidad
 2. Información generada por el proyecto de restauración
2. Estudios de Viabilidad
 1. Establecimiento de los objetivos de protección
 1. Definición de las metas preliminares de restauración (MPR)
 1. Aspectos legales
 2. Desarrollo inicial de las MPR
 3. Cálculo de metas preliminares de restauración
 2. Modificación de MPR. Niveles de restauración
 2. **Desarrollo y selección preliminar de alternativas**
 1. Unidades de operación
 2. Análisis detallado de alternativas

EV: Desarrollo y selección preliminar de alternativas

Una vez que ya se han establecido los objetivos de la restauración se procede al diseño de las acciones generales de respuesta, en las que se incluyen: tratamientos, excavaciones, confinamientos, bombeo, entre otras.

EV: Desarrollo y selección preliminar de alternativas

El proceso de desarrollar las alternativas de restauración del sitio consta de dos acciones importantes:

- La determinación de los volúmenes o áreas de desechos o medios ambientales que se tienen que tratar utilizando la información sobre la naturaleza y extensión de la contaminación, las RARA, los estudios de transporte y destino de los contaminantes y la información sobre toxicidad.
- La comparación de las tecnologías disponibles para identificar aquéllas que sea más efectivas para tratar los contaminantes y medios de interés en el sitio (base de datos VISITT).

Con esta información se integra la lista de alternativas de restauración para tratar el total del sitio o para realizar unidades de operación específicas.

Unidades de operación

La restauración se puede fraccionar en Unidades de Operación (UO). Las UO son acciones discretas que en su conjunto están dirigidas a obtener al final una restauración total de todo el sitio. Pueden ser acciones dirigidas a una porción geográfica o a un problema específico del sitio o al sitio completo.

Análisis detallado de alternativas

En caso de que se genere un número muy grande de alternativas tecnológicas, para hacer operable el estudio de viabilidad, es posible que sea conveniente reducir el número de las alternativas que se analizarán en detalle.

La evaluación de la protección global que proporciona una alternativa se debe enfocar en cómo se logra la protección, en qué tiempo y cómo reduce los riesgos en el sitio.

Análisis detallado de alternativas

El criterio de permanencia y efectividad a largo plazo es la evaluación de las actividades de restauración en base al riesgo residual en el sitio, después de que se han cumplido los objetivos de la acción de restauración.

La evaluación de la efectividad a corto plazo se enfoca en los impactos de la alternativa, durante la fase de operación, mientras se cumplen los objetivos de las acciones de restauración.

Finalmente...

Tecnologías de restauración ambiental...