Apuntes de la segunda prueba

Impactos Medioambientales

Suelo, salud, agua y recursos

Máster Universitario en Ingeniería de la Energía

ETSI Minas y Energía

Hugo Torres Orejudo

Noviembre 2026

Elaborado con IA a partir del material de la asignatura. Material no oficial.

Índice general

1 El suelo y el ciclo energético **2**
1.1 Qué es y para qué sirve . . . 2
1.2 Amenazas . . . 2
1.3 Relación con la energía . . . 2
1.4 Interacción suelo–contaminante . . . 3

2 Análisis de riesgos para la salud humana **3**
2.1 Peligro y riesgo . . . 3
2.2 Gestión de suelos contaminados . . . 3
2.3 Metodología . . . 3
2.4 Dosis y riesgo . . . 4

3 Impactos sobre el agua **4**
3.1 Agua y energía . . . 4
3.2 Huella hídrica . . . 4
3.3 Contaminación y calidad . . . 5

4 Agotamiento de recursos minerales **5**
4.1 Recursos y reservas . . . 5
4.2 Curva de Hubbert . . . 5
4.3 Minerales para la transición energética . . . 5

5 Cómo se pregunta **6**

Resumen

Resumen de los bloques que entran en la segunda prueba de evaluación continua (16 de diciembre de 2026, 35 % de la nota): impactos sobre el suelo, análisis de riesgos para la salud humana, impactos sobre el agua y agotamiento de recursos minerales. Complementa a los apuntes de la primera prueba. Los ejercicios resueltos están en un documento aparte.

1 El suelo y el ciclo energético

1.1 Qué es y para qué sirve

El suelo es la capa superior de la corteza terrestre, formada por partículas minerales, materia orgánica, agua, aire y organismos. Es la interfaz entre geosfera, atmósfera e hidrosfera y se considera un recurso **no renovable** a escala humana. Funciones: producción de alimentos y biomasa, almacenamiento y filtrado de agua y contaminantes, hábitat y reserva genética, soporte de infraestructuras, fuente de materias primas y archivo del patrimonio geológico y cultural.

1.2 Amenazas

Erosión y pérdida de materia orgánica, contaminación (local y difusa), sellado y compactación, salinización, pérdida de biodiversidad, inundaciones y deslizamientos. La estrategia de la UE para 2030 y la Directiva de vigilancia del suelo persiguen que todos los suelos estén sanos en 2050; hoy se estima que entre el 60 y el 70 % están degradados.

1.3 Relación con la energía

- **Minería** de carbón, uranio y minerales metálicos: drenaje ácido de mina por oxidación de sulfuros, que libera metales pesados.
- **Hidrocarburos**: derrames y fugas en extracción, refinerías, oleoductos y estaciones de servicio.
- **Deposición atmosférica** de contaminantes acidificantes (SO_2, NO_x) de la combustión. La **carga crítica** es el aporte máximo que el suelo admite sin cambios químicos dañinos a largo plazo.
- **Ocupación del suelo** por plantas renovables y redes.

1.4 Interacción suelo–contaminante

El comportamiento de un contaminante depende de sus propiedades y de las del suelo:

- **pH** ($\mathrm{pH} = -\log[\mathrm{H}^+]$): controla la solubilidad de los metales (más móviles en suelos ácidos), los equilibrios carbonatados y las reacciones redox.
- **Arcillas y materia orgánica**: retienen contaminantes por adsorción e intercambio iónico; un suelo arcilloso y rico en materia orgánica amortigua más.
- **Potencial redox, humedad y permeabilidad**: condicionan la degradación y el lavado hacia el acuífero (lixiviación).

Existe contaminación cuando se supera la **capacidad de amortiguación** del suelo y se limita alguna de sus funciones: en la práctica, cuando la concentración supera un **valor de referencia** fijado para un escenario de exposición y un uso del suelo (industrial, urbano, otros usos).

2 Análisis de riesgos para la salud humana

2.1 Peligro y riesgo

Peligro es el potencial de causar daño; **riesgo** es la probabilidad de que ese daño se produzca. Sin una vía que lleve el contaminante hasta un receptor no hay riesgo, por grande que sea el peligro.

2.2 Gestión de suelos contaminados

1. **Identificación**: inventario de emplazamientos con actividades potencialmente contaminantes.
2. **Investigación y diagnóstico**: muestreo y análisis para decidir si hay que actuar.
3. **Recuperación**: diseño y ejecución de la descontaminación o de medidas de control y seguimiento.

2.3 Metodología

1. **Modelo conceptual**: foco (contaminantes y concentraciones) → ruta de exposición (suelo, polvo, agua subterránea o superficial, aire) → receptores (personas, ecosistemas).
2. **Análisis de la exposición**: concentración en el punto de exposición y dosis recibida.
3. **Evaluación de la toxicidad**: dosis de referencia (no cancerígenos) o factor de pendiente (cancerígenos).
4. **Caracterización del riesgo** y **análisis de incertidumbres**.

Vías de entrada: ingestión (agua, suelo, alimentos), inhalación (gases y partículas) y contacto dérmico.

2.4 Dosis y riesgo

Fórmulas clave

Dosis diaria: $I = \dfrac{C \cdot CR \cdot EF \cdot ED}{BW \cdot AT}$ (mg/kg·día); suelo: C en mg/kg, CR en mg/día y factor 10^{-6} kg/mg.

No cancerígenos ($AT = ED \cdot 365$): cociente de peligro $HQ = I/RfD$; índice de peligro $HI = \sum HQ$. Riesgo aceptable si $HI < 1$.

Cancerígenos ($AT = 70 \cdot 365 = 25\,550$ días): riesgo $= I \cdot SF$. Aceptable por debajo de 10^{-5} (criterio habitual en España; 10^{-6} en escenarios más estrictos).

Valores típicos de escenario residencial (adulto): agua 2 L/día, suelo 100 mg/día (niño 200), inhalación 20 m^3/día, $EF = 350$ días/año, $ED = 30$ años, $BW = 70$ kg (niño 15).

Idea clave

Para cancerígenos se promedia la dosis sobre toda la vida, por eso AT es mucho mayor que ED y la dosis "cancerígena" es menor que la "no cancerígena" con los mismos datos. Se puede invertir la ecuación para obtener la concentración máxima admisible en el suelo para un riesgo objetivo.

3 Impactos sobre el agua

3.1 Agua y energía

Agua y energía están ligadas en los dos sentidos: casi toda la producción de energía usa agua (refrigeración de centrales térmicas, hidráulica, extracción de combustibles, biocombustibles, hidrógeno) y el ciclo del agua consume energía (bombeo, potabilización, desalación, depuración). Hay que distinguir:

- **Extracción** (uso): volumen total captado de una masa de agua.
- **Consumo**: la parte que no vuelve a la cuenca (evaporación, incorporación al producto). La refrigeración en circuito abierto extrae mucho y consume poco; con torres de refrigeración extrae menos pero consume más.

3.2 Huella hídrica

Volumen total de agua dulce usado, directa e indirectamente, para producir un bien o servicio a lo largo de su ciclo de vida:

- **Azul**: agua superficial o subterránea consumida (evaporada, incorporada o devuelta a otra cuenca o al mar).
- **Verde**: agua de lluvia consumida, sobre todo en agricultura.
- **Gris**: volumen necesario para diluir la carga contaminante hasta cumplir los estándares de calidad: $HH_{gris} = \dfrac{L}{c_{max} - c_{nat}}$.

3.3 Contaminación y calidad

Parámetros: temperatura (contaminación térmica por refrigeración), oxígeno disuelto, DBO y DQO (materia orgánica), nutrientes (nitrógeno y fósforo, que causan **eutrofización**), pH (drenaje ácido de mina), metales pesados, hidrocarburos y sales. Los acuíferos sobreexplotados y contaminados son el problema de más largo plazo.

4 Agotamiento de recursos minerales

4.1 Recursos y reservas

- **Recurso**: concentración de mineral con posibilidad razonable de extracción económica en el futuro.
- **Reserva**: la parte del recurso que hoy es técnica y económicamente explotable. Crece con los precios, la tecnología y la exploración.
- **Ratio reservas/producción** R/P: años que durarían las reservas al ritmo actual. Si la producción crece a una tasa r, se agotan en $T = \dfrac{\ln(1 + r\,R/P)}{r}$, mucho antes.

4.2 Curva de Hubbert

La producción acumulada sigue una logística $Q(t) = \dfrac{URR}{1 + e^{-b(t - t_m)}}$, con URR los recursos recuperables totales. La producción anual es una campana con su pico en t_m, cuando se ha extraído la mitad, de valor $P_{max} = b\,URR/4$.

4.3 Minerales para la transición energética

Baterías, renovables y redes requieren litio, cobalto, níquel, grafito, cobre, tierras raras y otros. Su **criticidad** combina importancia económica y riesgo de suministro (concentración geográfica de la producción y del refino, estabilidad política, sustituibilidad, reciclado). La UE publica la lista de materias primas críticas y estratégicas. Respuestas: diversificar el suministro, minería y refino propios con estándares ambientales, eficiencia, sustitución y reciclado (economía circular).

5 Cómo se pregunta

1. Conceptos: funciones del suelo, amenazas, factores que controlan la movilidad de un contaminante, peligro frente a riesgo, fases de la gestión de suelos.
2. Cálculo de dosis, HQ, HI y riesgo cancerígeno; concentración admisible para un riesgo objetivo.
3. Extracción frente a consumo de agua y huella hídrica (azul, verde, gris).
4. Recursos frente a reservas, R/P con crecimiento, pico de Hubbert y criticidad.

Errores típicos

Usar $AT = ED \cdot 365$ para cancerígenos. Olvidar el factor 10^{-6} kg/mg en la ingestión de suelo. Sumar riesgos de no cancerígenos y cancerígenos. Confundir extracción con consumo de agua.