



LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN EN SUELOS CONTAMINADOS



Juan Carlos Fernández Caliani
Departamento de Ciencias de la Tierra
Universidad de Huelva



Proyecto de I+D+i en colaboración con el tejido productivo

DISEÑO Y APLICACIÓN DE TECNOSUELOS FORMULADOS CON RESIDUOS NO PELIGROSOS PARA LA RECUPERACIÓN AMBIENTAL DE ESPACIOS MINEROS Y EL SELLADO DE VERTEDEROS



El **equipo investigador** está conformado por 8 investigadores/as pertenecientes a 5 grupos de investigación diferentes del Plan Andaluz de Investigación (PAI):

- Geología y Geoquímica Ambiental (RNM347)
- Análisis Metalómico y Medioambiental (FQM349)
- Tecnologías de Recursos Renovables y Contaminación Ambiental (RNM371)
- Mineralogía Aplicada (RNM135)
- Respuesta y Adaptaciones Celulares frente al Estrés Ambiental (BIO282)

Objetivos técnicos:

- Valorizar RNP cuya única posibilidad de gestión es el depósito en vertedero.
- Producir Tecnosuelos con aptitud para la recuperación ambiental de suelos mineros y la construcción de la capa de cobertura de vertederos.

Objetivos ambientales:

- Mejorar la capacidad de neutralización de la acidez y de inmovilización de contaminantes tóxicos en los suelos mineros.
- Estabilizar C en suelo y biomasa, y reciclar N, P, K y otros nutrientes para sostener una infraestructura verde sin efectos adversos para el medio ambiente.

Primera anualidad
2021

Etapa I
Diagnóstico
**Caracterización de los
suelos a tratar y de los
residuos a emplear**

Segunda anualidad
2022

Etapa II
Implementación
**Diseño, formulación
y aplicación de los
tecnosuelos**

Tercera anualidad
2023

Etapa III
Seguimiento
**Monitorización
y evaluación
de resultados**

Selección y caracterización de los suelos mineros a tratar



Suelos contaminados con:

- S1: **piritas oxidadas**
- S2: **cenizas de pirita**
- S3: **escorias de cobre**
- S4: **piritas lixiviadas**
- S5: **drenaje ácido de mina**

- **Composición química y mineralógica**
- **Caracterización físico-química**

Acidez total = Acidez activa + Acidez intercambiable + Acidez latente + Acidez retenida

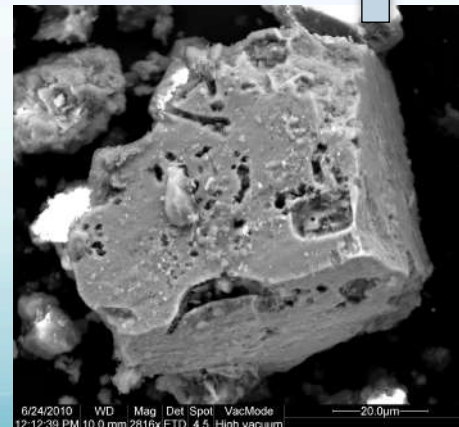
➤ **Ensayos estáticos:**

- Test ABA (*Acid-Base Accounting*)
- Test NAG (*Net Acid Generation*)

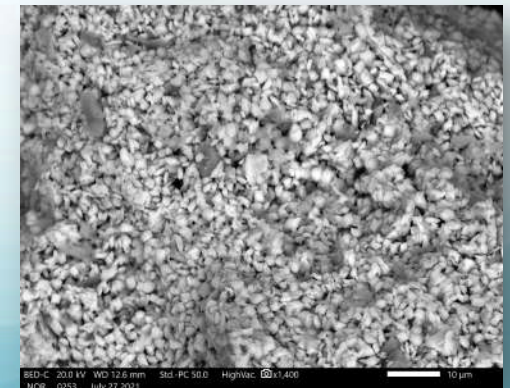
➤ **Ensayos de lixiviación**

UNE-EN 12457-4 (relación L/S = 10 L kg⁻¹)

Pirita



Jarosita



Criterios de selección de RNP

- ✓ **Cumplen los criterios de admisión de la ITR/01/08 de la Xunta de Galicia** (único documento de referencia sobre la producción de Tecnosuelos).
- ✓ **Se gestionan regularmente en el Centro de Nerva.**
- ✓ **Presentan un comportamiento aceptable en los ensayos de lixiviación.**

LER	Residuos No peligrosos
030311	Lodos del tratamiento de aguas de planta de biomasa*
050110	Lodos del tratamiento biológico de efluentes de refinería*
061101	Residuos de la producción de dióxido de titanio (yesos rojos)**
100202	Escorias blancas procedentes de la siderurgia**
100903	Escorias de horno de fundición de piezas férreas**
100906	Arenas de moldeo de fundiciones férreas**
190112	Escorias de incineración de residuos sólidos urbanos**
190902	Lodos de clarificación de aguas*
010412	Lodos del lavado de áridos**

* **RNP** Aportan materia orgánica y nutrientes.

** **RNP** Estabilizan los compuestos orgánicos y proporcionan las propiedades deseadas (capacidad de neutralización y adsorción)



- Olor, color, homogeneidad
- Composición y granulometría
- pH y conductividad eléctrica
- C y N totales
- P y K asimilables
- Contenido de elementos traza
- Contenido de hidrocarburos totales

FORMULACIÓN DE LOS TECNOSUELOS

➤ T2: R2_[60] + (R4+R6)_[40]

➤ T3: R3_[60] + (R4+R6)_[40]

➤ T5: R2_[60] + (R5+R6)_[40]

➤ T6: R3_[60] + (R5+R6)_[40]

➤ T8: R2_[60] + R4_[40]

➤ T9: R3_[60] + R4_[40]

➤ T11: R2_[60] + R5_[40]

➤ T12: R3_[60] + R5_[40]

➤ R2: Lodos de clarificación de aguas

➤ R3: Lodos biológicos de refinería

➤ R4: Escorias blancas

➤ R5: Escorias de horno

➤ R6: Yesos rojos

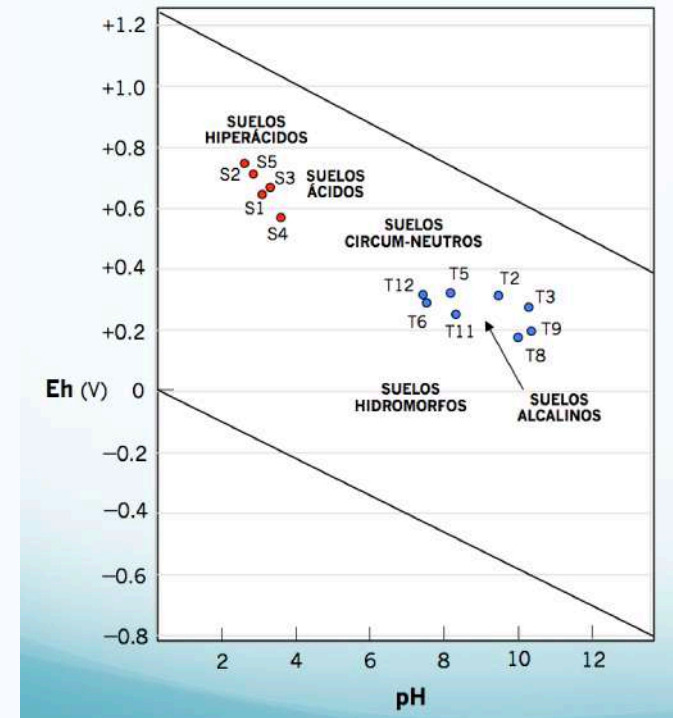
➤ S1: suelo contaminado con pirritas oxidadas

➤ S2: suelo contaminado con cenizas de pirita

➤ S3: suelo contaminado con escorias de cobre

➤ S4: suelo contaminado con pirritas lixiviadas

➤ S5: suelo contaminado por DAM



TECNOSOL	T2	T3	T5	T6	T8	T9	T11	T12
Eutrofizante Suministrar nutrientes y favorecer la actividad biológica	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Neutralizante Incrementar el pH para que precipiten Fe, Al, sulfatos y metales	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Adsorbente Adsorber oxianiones (e.g. arseniatos)	✓	✓	✓	✓				

DOSIFICACIÓN Y MEZCLADO

1ª fase (general): 72 mezclas suelo/tecnosol a la dosis de 50:50 y 75:25 (w/w)

2ª fase (reajuste): 36 mezclas a diferentes dosis de tecnosol (40, 35, 30, 20, 15 y 5%)

S1T2-50	S1T3-50	S1T5-50	S1T6-50	S1T8-50	S1T9-50	S1T11-50	S1T12-50
S1T2-25	S1T3-25	S1T5-35	S1T6-35	S1T8-25	S1T9-25	S1T11-30	S1T12-35
S1T2-10	S1T3-10	S1T5-25	S1T6-25	S1T8-10	S1T9-10	S1T11-25	S1T12-25
S1T2-5							

S2T8-50	S2T9-50	S2T11-50	S2T12-50	S3T2-50	S3T3-50	S3T5-50	S3T6-50
S2T8-25	S2T9-25	S2T11-25	S2T12-25	S3T2-25	S3T3-25	S3T5-25	S3T6-25
S2T8-10	S2T9-5	S2T11-15	S2T12-15	S3T2-10	S3T3-5	S3T5-20	

S3T8-50	S3T9-50	S3T11-50	S3T12-50	S4T2-50	S4T3-50	S4T5-50	S4T6-50
S3T8-25	S3T9-25	S3T11-25	S3T12-25	S4T2-25	S4T3-25	S4T5-25	S4T6-25
S3T8-5	S3T9-5	S3T11-20	S3T12-20	S4T2-5	S4T3-5	S4T5-5	S4T6-15

S4T8-50	S4T9-50	S4T11-50	S4T12-50	S5T2-50	S5T3-50	S5T5-50	S5T6-50
S4T8-25	S4T9-25	S4T11-25	S4T12-25	S5T2-25	S5T3-25	S5T5-40	S5T6-30
S4T8-5	S4T9-5	S4T11-5	S4T12-5	S5T2-10	S5T3-15	S5T5-25	S5T6-25

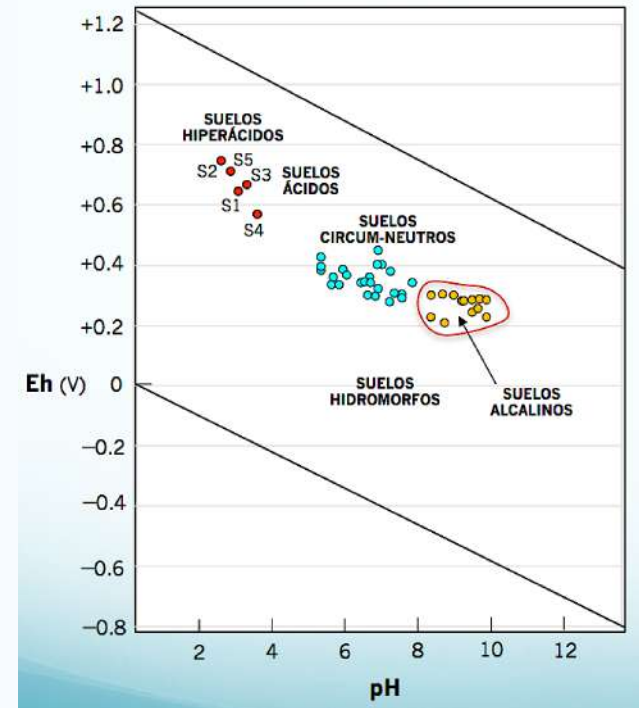
S5T8-50	S5T9-50	S5T11-50	S5T12-50
S5T8-25	S5T9-25	S5T11-35	S5T12-35
S5T8-5	S5T9-5	S5T11-25	S5T12-25

SELECCIÓN DE LAS MEZCLAS MÁS IDÓNEAS

Cumplimiento de las siguientes condiciones

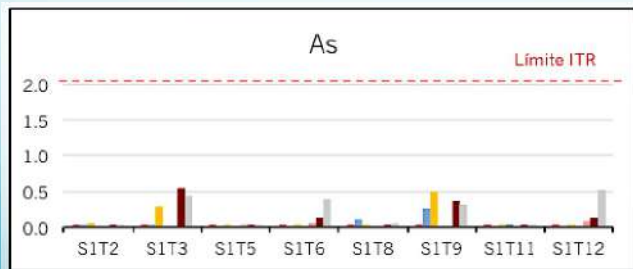
- ✓ Reacción neutra o ligeramente ácida
- ✓ Textura de franco arenosa a franco limosa
- ✓ Materia orgánica > 4%
- ✓ No superan los contenidos de elementos traza establecidos en la ITR 01/08
- ✓ No superan los valores límite de lixiviación establecidos en la ITR 01/08
- ✓ Comportamiento aceptable en los ensayos de disponibilidad y bioaccesibilidad
- ✓ Fértiles para el desarrollo de la vegetación: experimentación en macetas
- ✓ No suponen un riesgo inaceptable para la salud humana y los ecosistemas

- Proyección de las mezclas más idóneas

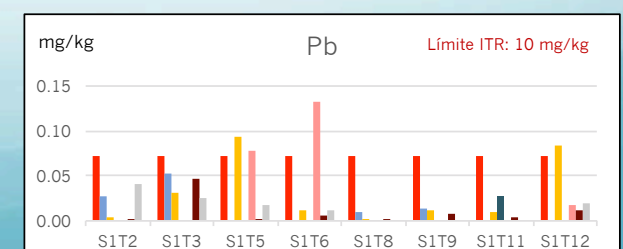
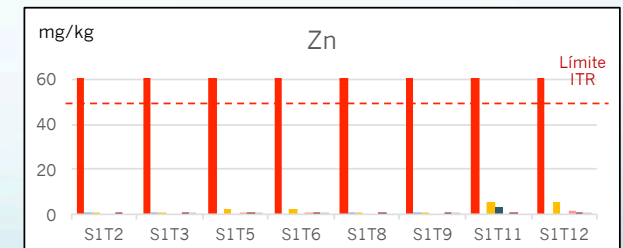
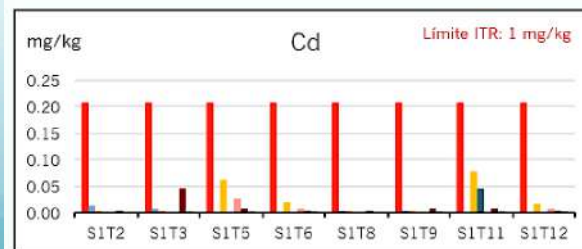
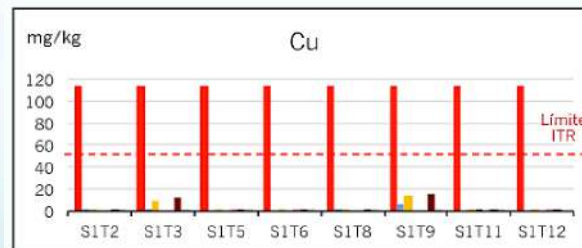


ENSAYOS DE LIXIVIACIÓN

MEZCLAS SUELO 1 TECNOSUELOS

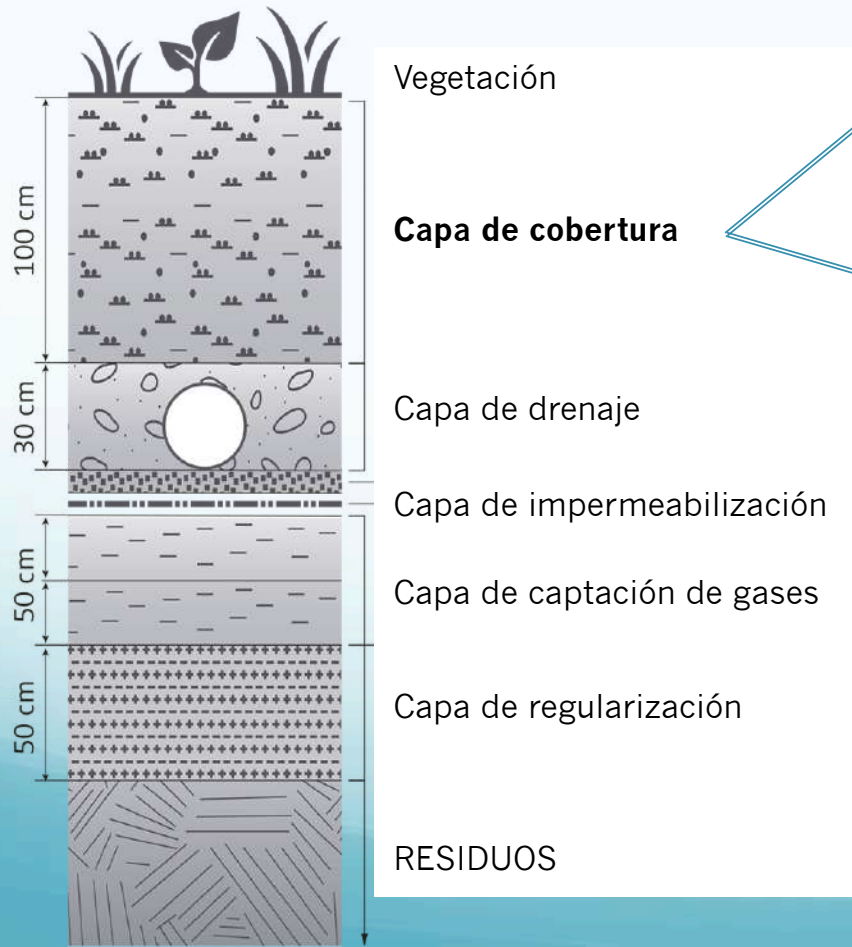


■ Control ■ 10% T ■ 25% T ■ 30% T ■ 35% T ■ 50% T ■ Tecnosuelos (T)



Tecnosuelo con aptitud para la construcción de la capa de cobertera final de la secuencia de sellado de vertederos

- Reducir la extracción y aporte de un recurso escaso y no renovable como la tierra vegetal.
- Contribución a la mejora del proceso tecnológico de clausura.



20 cm (horizonte A)

Propiedades edáficas y nutricionales que permitan el crecimiento vegetal

80 cm (Horizonte C)

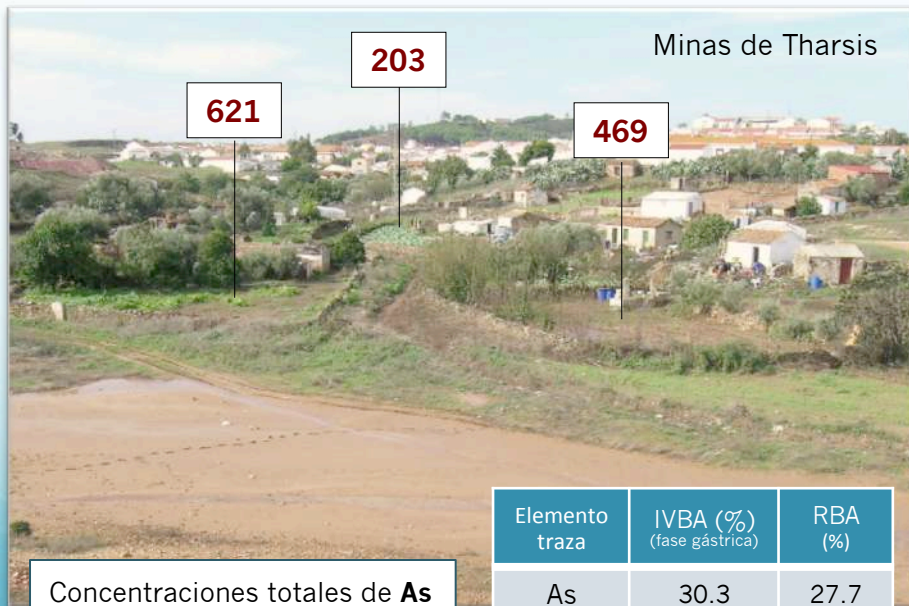
Material compactable, que permita el drenaje lateral (baja permeabilidad vertical) y sea resistente a los agentes disgregantes



OTRAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Evaluación del riesgo para la salud humana de suelos agrícolas potencialmente contaminados por elementos traza de origen minero

- Determinación de la **bioaccesibilidad oral** (suelo y hortalizas) → ensayos in vitro (IVBA)
- Estimación de la **biodisponibilidad oral relativa** (RBA) → modelos estadísticos de regresión lineal

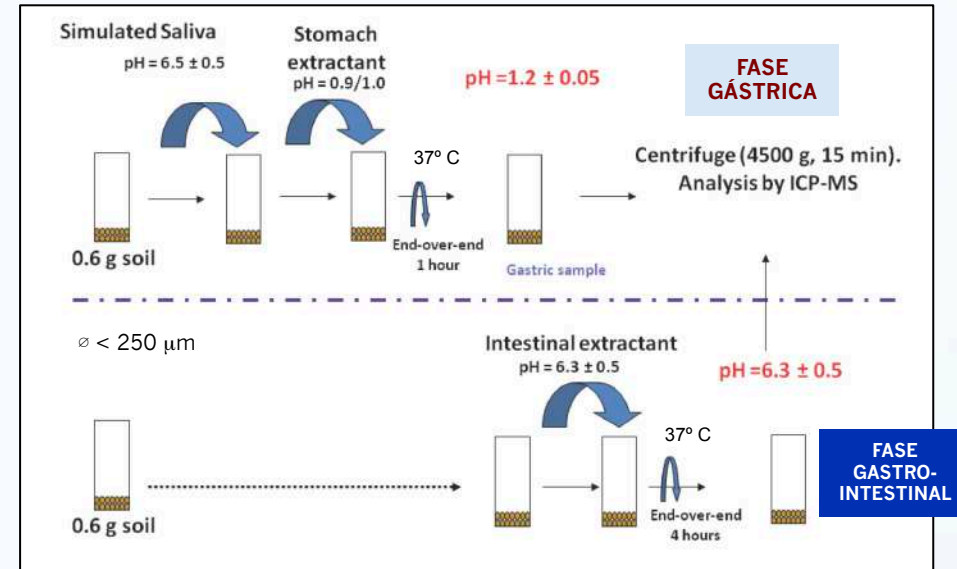


Minas de Tharsis

Concentraciones totales de **As**
NGR (uso agrícola): 36 mg kg⁻¹

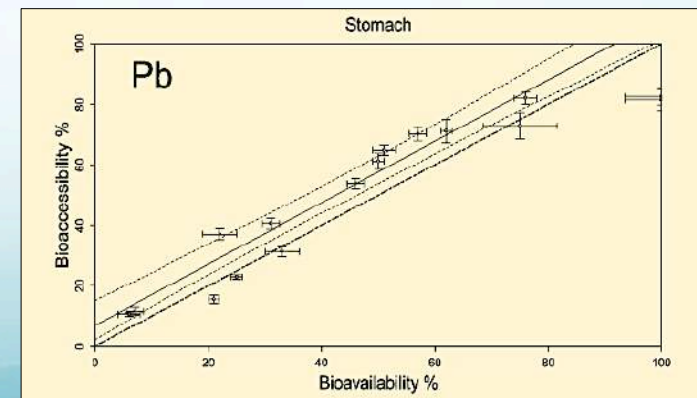
Elemento traza	IVBA (%) (fase gástrica)	RBA (%)
As	30.3	27.7
Pb	48.7	42.6

Bioaccesibilidad de elementos traza determinada mediante **simulación in vitro de la digestión humana**.
Método del Bio-Accessibility Research Group of Europe (BARGE)



Las fracciones biodisponibles de As y Pb son < 50%

Usar un valor RBA igual a 100% por defecto no es apropiado para estimar el riesgo



RIESGO AJUSTADO A LA DOSIS ABSORBIDA

RIESGO CANCERÍGENO (CR)

RIESGO TÓXICO (HQ)



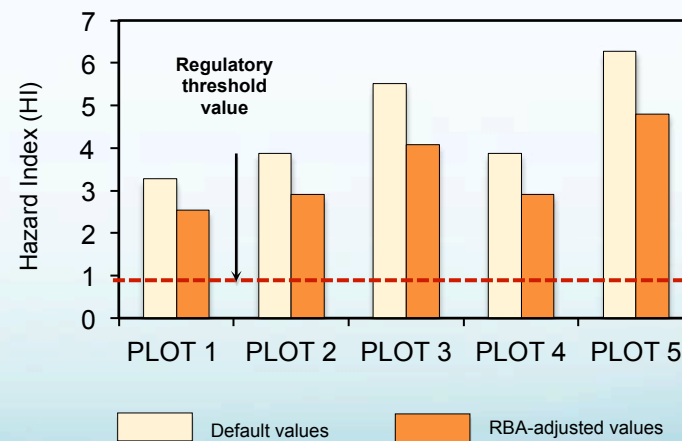
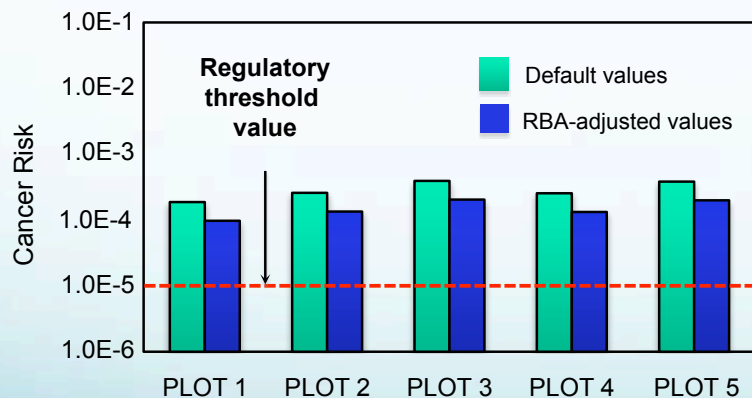
$$CR_{adjusted} = D \times RBA \times SF$$

$$HQ_{adjusted} = D \times RBA \times RfD$$

Dosis absorbida

D: dosis de exposición (mg/kg día)
 RfD: dosis de referencia (mg/kg día)
 RBA: biodisponibilidad oral relativa
 SF: factor pendiente (mg/kg día)⁻¹

Suelos agrícolas de Tharsis



OTRAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Detección de zonas con características geológicas singulares (*hot spots*) donde las **concentraciones naturales** de elementos traza en los suelos superen a los NGRs para su uso.



Enriquecimiento geogénico de elementos traza

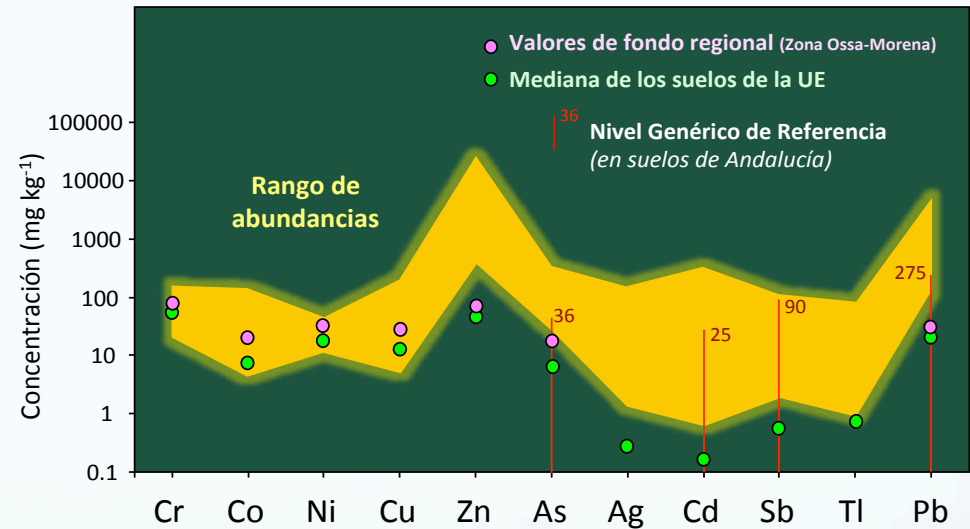


Sierra de Aracena



Roca madre

RETO 1: se requieren valores de referencia y criterios específicos para declarar un suelo como contaminado por actividades antrópicas



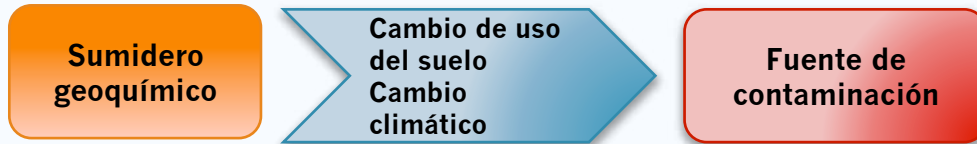
Los valores de fondo de algunos elementos traza superan los NGRs

Valores de fondo natural
(Me + 2MAD)

Elemento (mg kg ⁻¹)	Cd	Cr	Ni	Co	Bi	Se	Zn	As	Sb	Cu	Tl	Pb
Suelo superficial	22.6	84.7	40.8	30.6	0.91	2.6	9128	125	39.4	50.9	3.69	1228

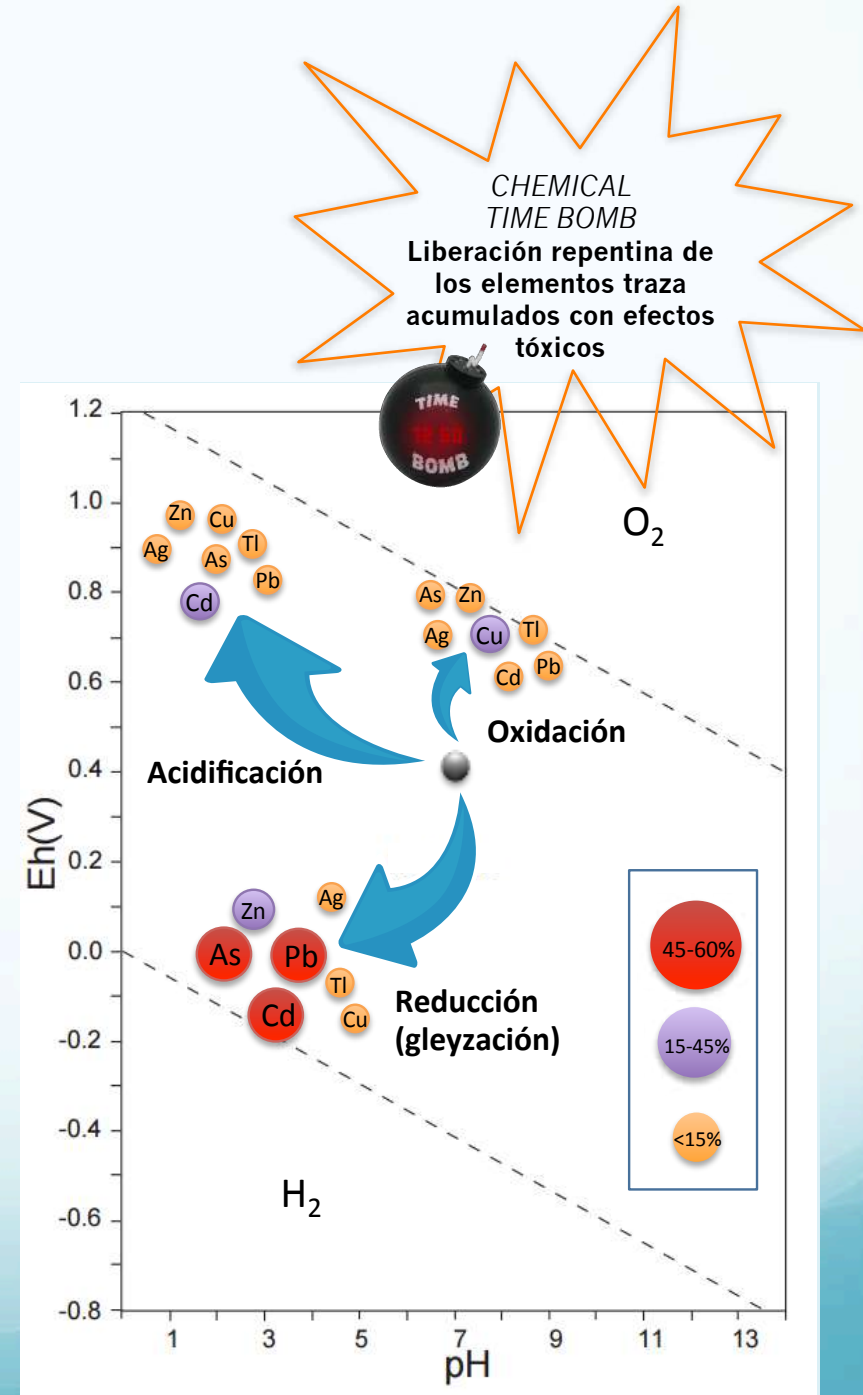
Me (media); MAD (mediana de la desviación absoluta)

Fraccionamiento geoquímico y destino ambiental



RETO 2: Predecir el comportamiento geoquímico de los elementos traza ante condiciones ambientales actuales y potenciales

Condiciones ambientales		Muy móvil (>50%)	Móvil (5-50%)	Poco móvil (1-5%)	Inmóvil (<1%)
ACTUALES (movilidad natural)	Oxidantes (Eh= 436 mV) a pH neutro			Cd	As, Ag, Cu, Pb, Tl, Zn
	Acidificación (pH 2,8)		Cd	Zn, Pb, Cu, As	Ag, Tl
POTENCIALES (movilidad provocada)	Reducción moderada	Pb	Cd, Zn	As, Cu, Ag, Tl	
	Reducción fuerte	As	Zn, Tl	Ag, Cu, Cd, Pb	
	Oxidación		Cu, Cd, Pb	As, Ag, Zn, Tl	





*Muchas gracias
por la atención*