



## 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

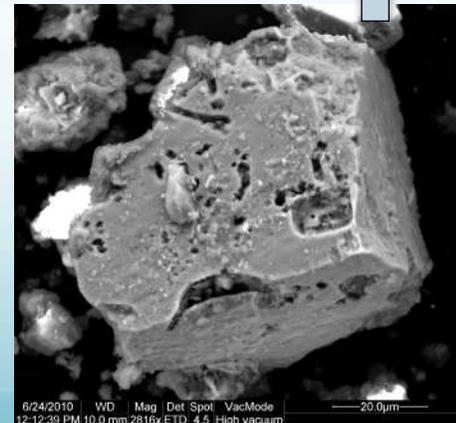
## ➤ Ensayos estáticos:

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

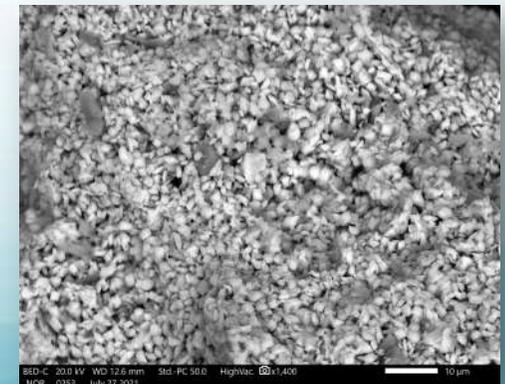
## ➤ Ensayos de lixiviación

UNE-EN 12457-4 (relación L/S = 10 L kg<sup>-1</sup>)

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<sub>[60]</sub> + (R4+R6)<sub>[40]</sub>

➤ T3: R3<sub>[60]</sub> + (R4+R6)<sub>[40]</sub>

➤ T5: R2<sub>[60]</sub> + (R5+R6)<sub>[40]</sub>

➤ T6: R3<sub>[60]</sub> + (R5+R6)<sub>[40]</sub>

➤ T8: R2<sub>[60]</sub> + R4<sub>[40]</sub>

➤ T9: R3<sub>[60]</sub> + R4<sub>[40]</sub>

➤ T11: R2<sub>[60]</sub> + R5<sub>[40]</sub>

➤ T12: R3<sub>[60]</sub> + R5<sub>[40]</sub>

➤ R2: Lodos de clarificación de aguas

➤ R3: Lodos biológicos de refinera

➤ R4: Escorias blancas

➤ R5: Escorias de horno

➤ R6: Yesos rojos

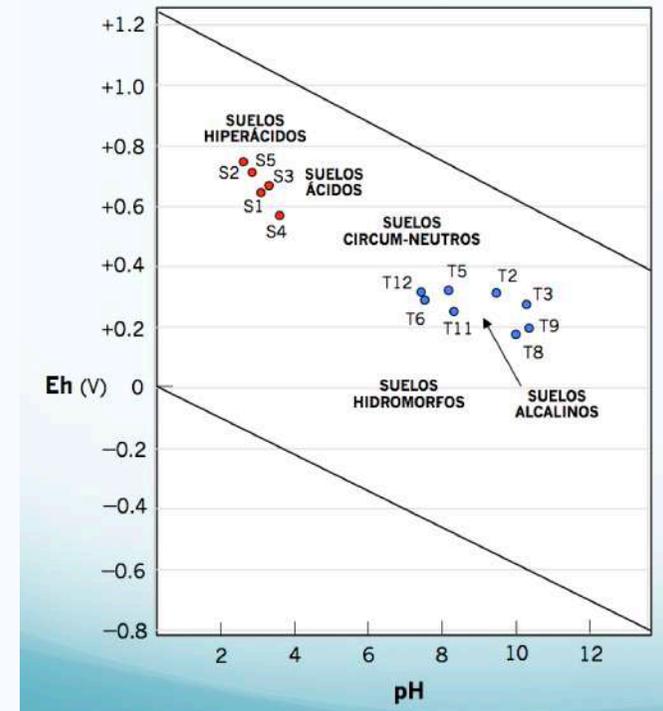
➤ S1: suelo contaminado con pirritas oxidadas

➤ 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
<b>Eutrofizante</b> Suministrar nutrientes y favorecer la actividad biológica	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
<b>Neutralizante</b> Incrementar el pH para que precipiten Fe, Al, sulfatos y metales	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
<b>Adsorbente</b> 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	S311-20	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

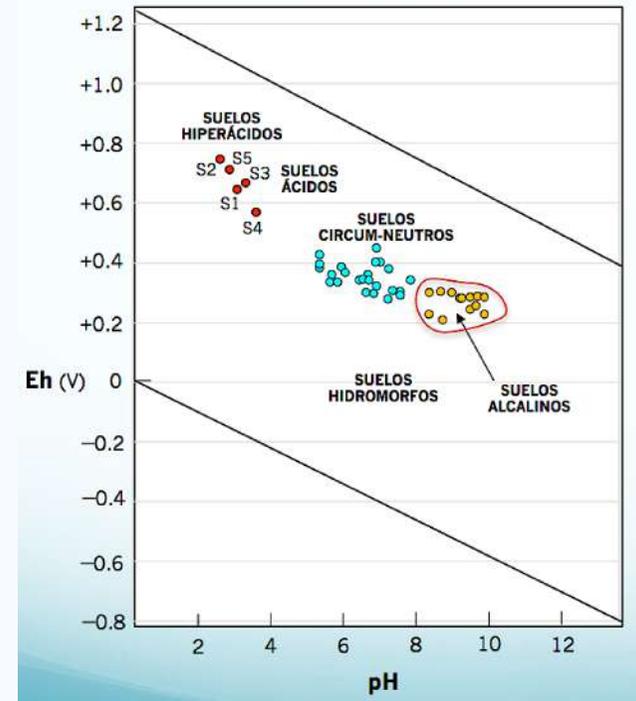
S5T8-50	S5T9-50	S5T11-50	S5T12-50
S5T8-25	S5T9-25	S5T11-35	S5T12-35
S5T8-5	S5T9-5	S5T11-25	S5T12-25

# SELECCIÓN DE LAS MEZCLAS MÁS IDÓNEAS

## Cumplimiento de las siguientes condiciones

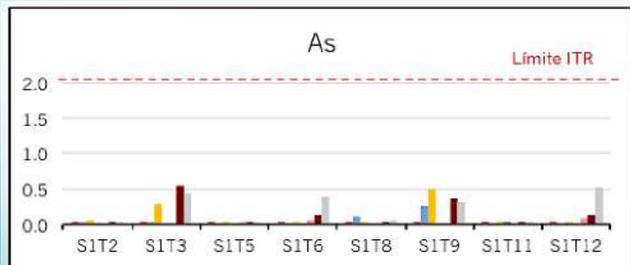
- ✓ Reacción neutra o ligeramente ácida
- ✓ Textura de franco arenosa a franco limosa
- ✓ Materia orgánica > 4%
- ✓ No superan los contenidos de elementos traza establecidos en la ITR 01/08
- ✓ No superan los valores límite de lixiviación establecidos en la ITR 01/08
- ✓ Comportamiento aceptable en los 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

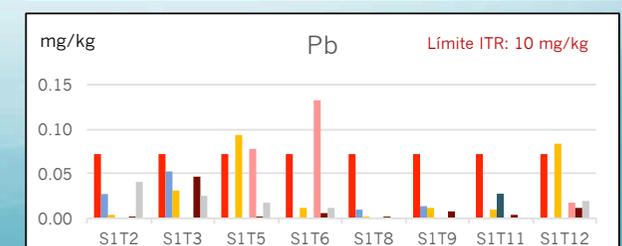
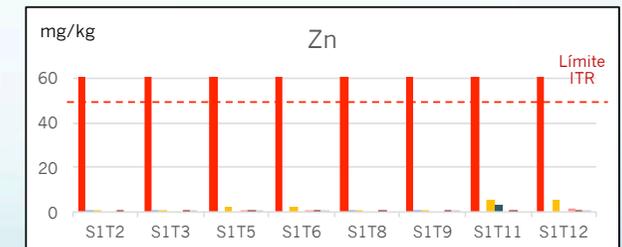
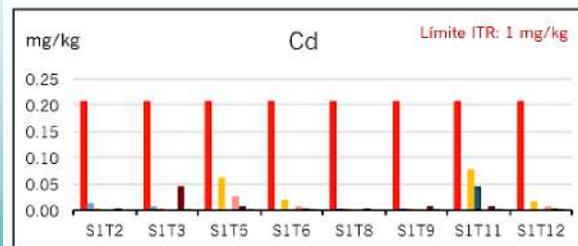
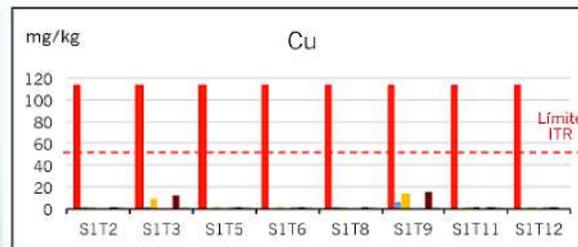


## ENSAYOS DE LIXIVIACIÓN

### MEZCLAS SUELO 1 TECNOSUELOS

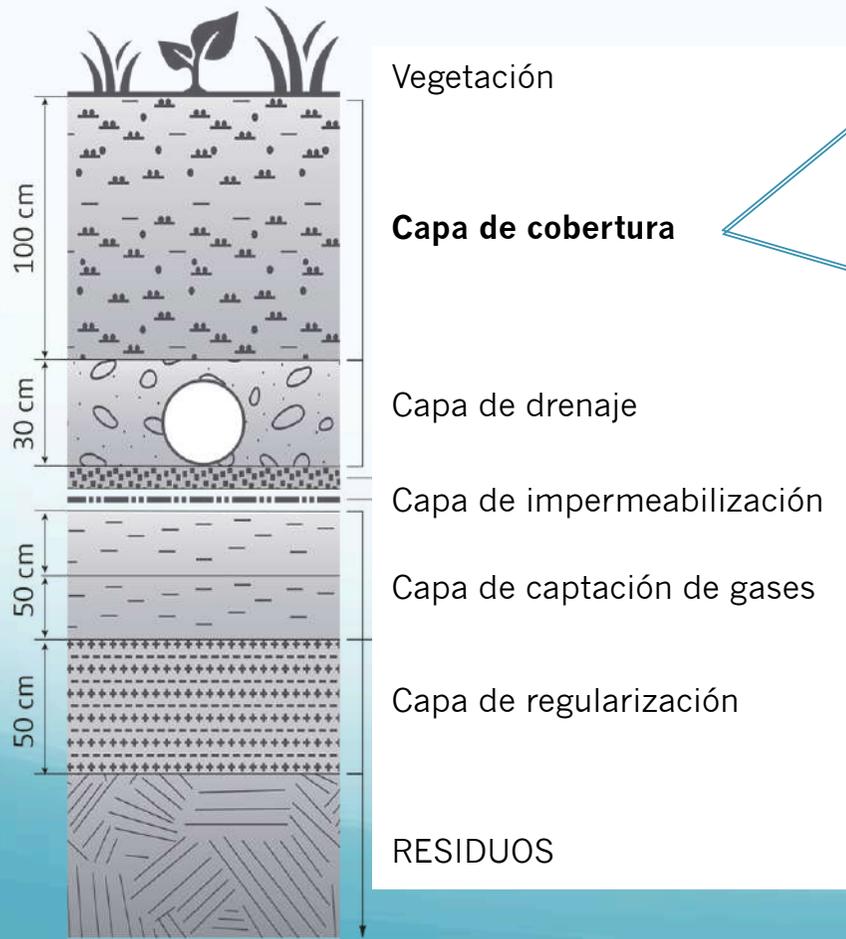


■ Control ■ 10% T ■ 25% T ■ 30% T ■ 35% T ■ 50% T ■ Tecnosuelos (T)



# 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

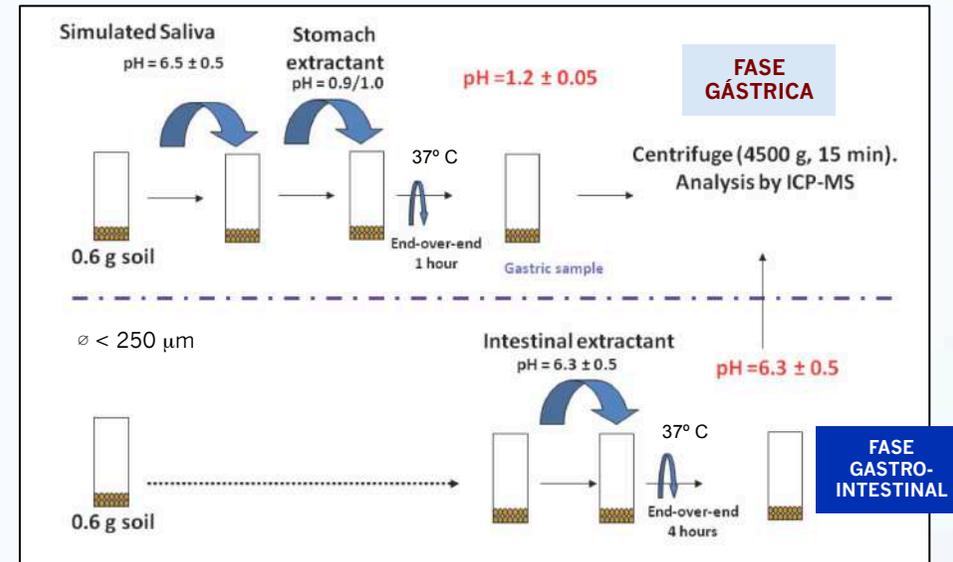


Minas de Tharsis

Concentraciones totales de **As**  
NGR (uso agrícola): 36 mg kg<sup>-1</sup>

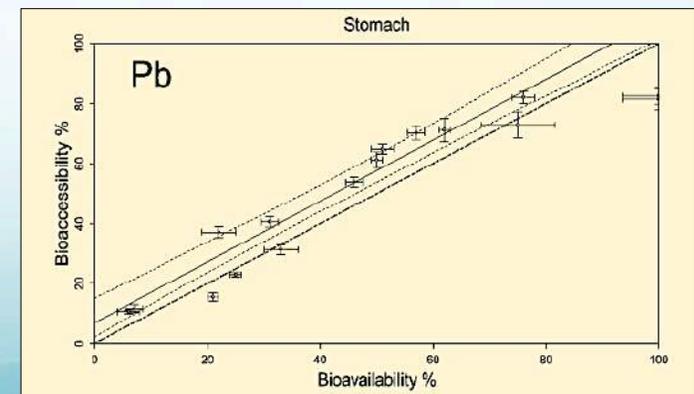
Elemento traza	IVBA (%) (fase gástrica)	RBA (%)
As	30.3	27.7
Pb	48.7	42.6

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)

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

## RIESGO TÓXICO (HQ)

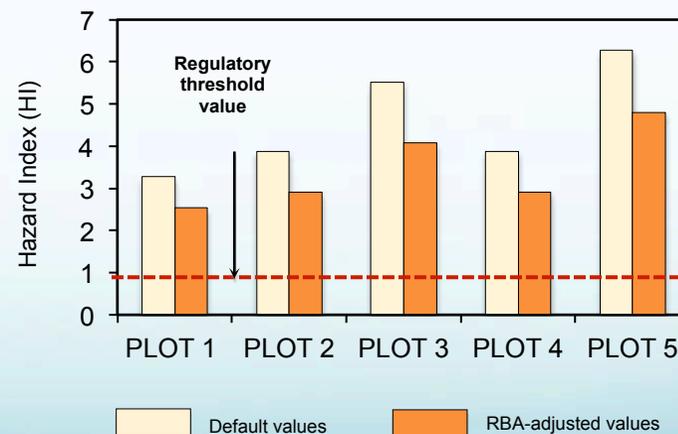
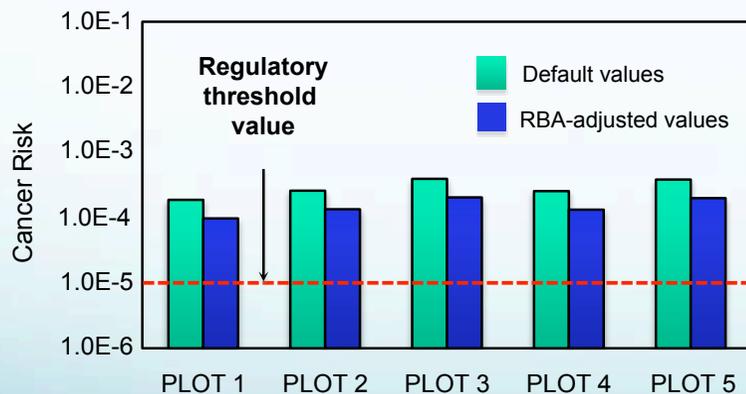
$$HQ_{adjusted} = D \times RBA \times RfD$$

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)<sup>-1</sup>

## 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

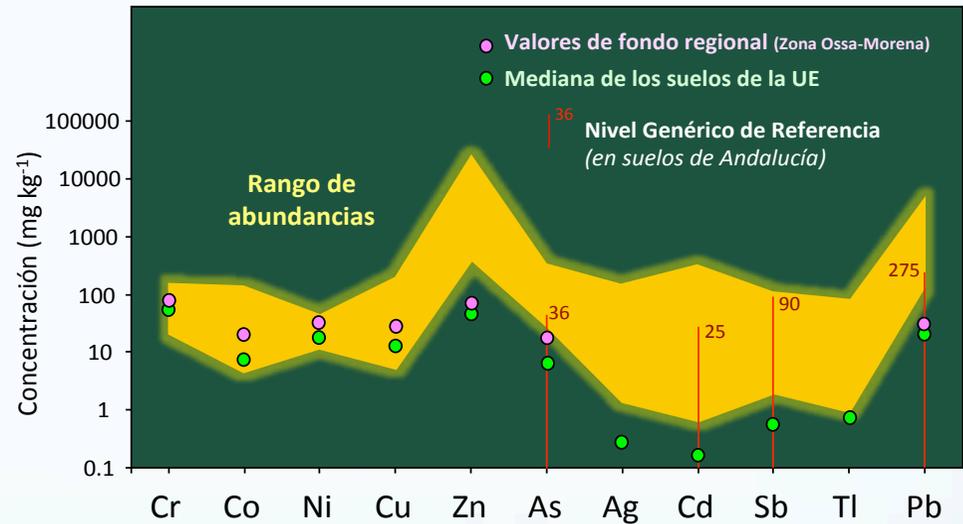


Sierra de Aracena



Roca madre

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



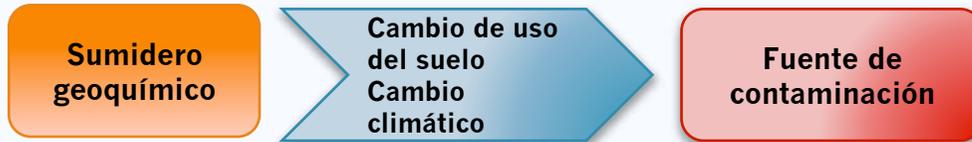
Los valores de fondo de algunos elementos elementos traza superan los NGRs

**Valores de fondo natural**  
(Me + 2MAD)

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

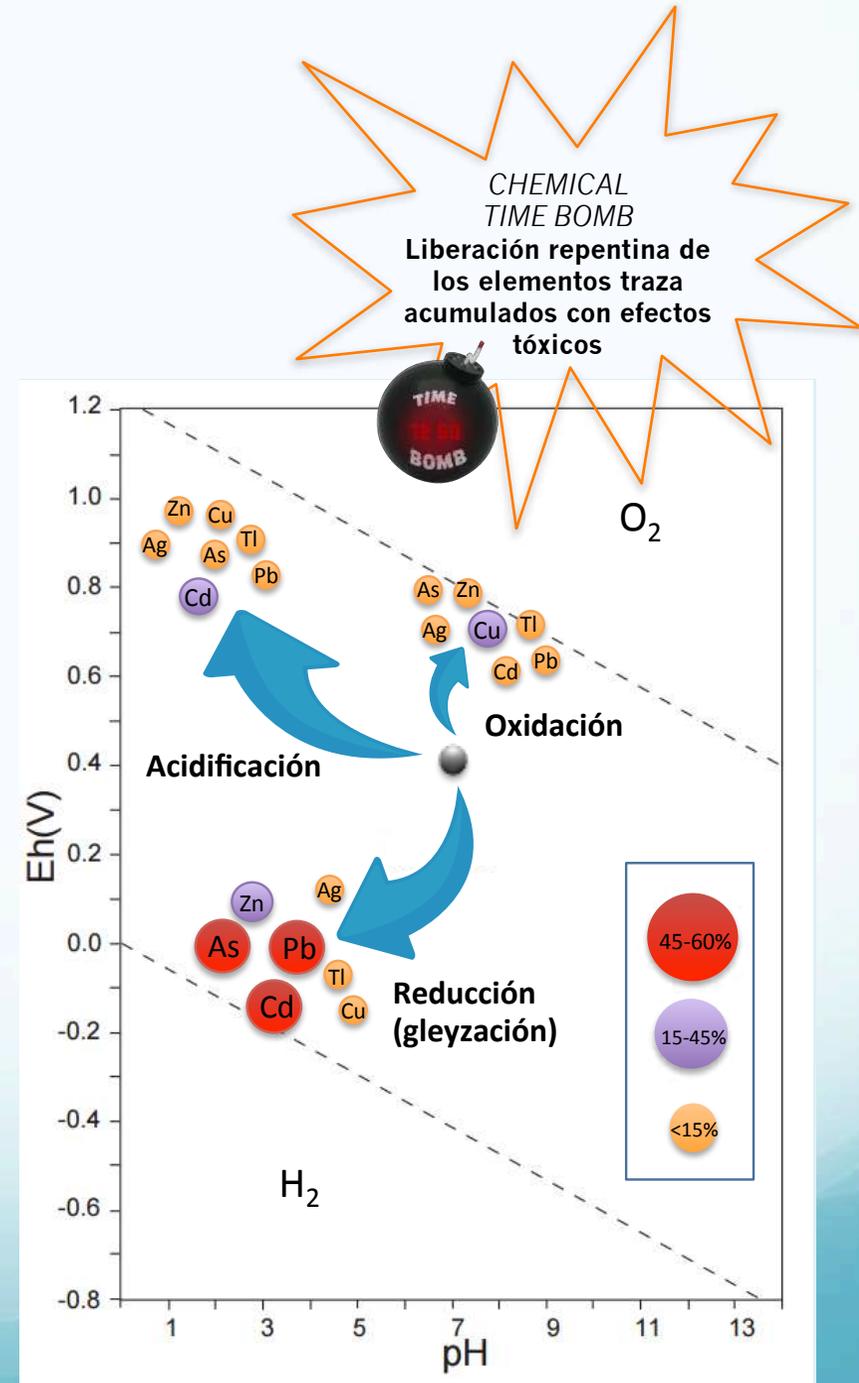
Me (media); MAD (mediana de la desviación absoluta)

# 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)	<b>Oxidantes</b> (Eh= 436 mV) a pH neutro			Cd	As, Ag, Cu, Pb, Tl, Zn
	<b>Acidificación</b> (pH 2,8)		Cd	Zn, Pb, Cu, As	Ag, Tl
POTENCIALES (movilidad provocada)	<b>Reducción moderada</b>	Pb	Cd, Zn	As, Cu, Ag, Tl	
	<b>Reducción fuerte</b>	As	Zn, Tl	Ag, Cu, Cd, Pb	
	<b>Oxidación</b>		Cu, Cd, Pb	As, Ag, Zn, Tl	





*Muchas gracias  
por la atención*