



## Límites materiales

*Alicia Valero*

22 septiembre 2015

El futuro de la tecnología después de la era del petróleo

UVa – Curso de Verano

Edificio CIRCE / Campus Río Ebro / Mariano Esquillor Gómez, 15 / 50018 ZARAGOZA

Tfno. (+34) 976 761 863 / Fax (+34) 976 732 078 / web: [www.fcirce.es](http://www.fcirce.es) / email: [circe@fcirce.es](mailto:circe@fcirce.es)

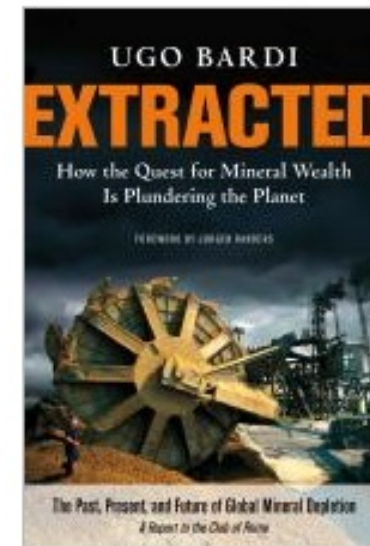
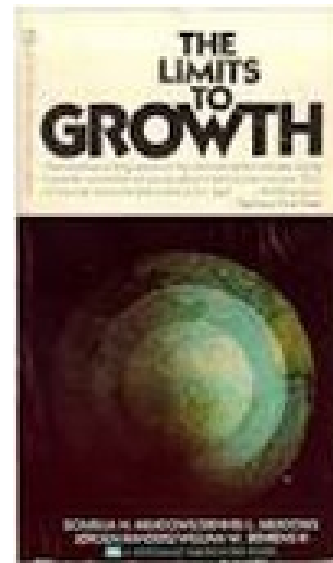


# Contenidos



- 1. Hechos conocidos sobre el uso de recursos minerales**
- 2. La termodinámica como la economía de la materia**
- 3. Thanatia y el segundo principio de la Termodinámica**
- 4. El segundo principio y la contabilidad de recursos minerales**
- 5. Reflexiones finales**

# 1. HECHOS CONOCIDOS



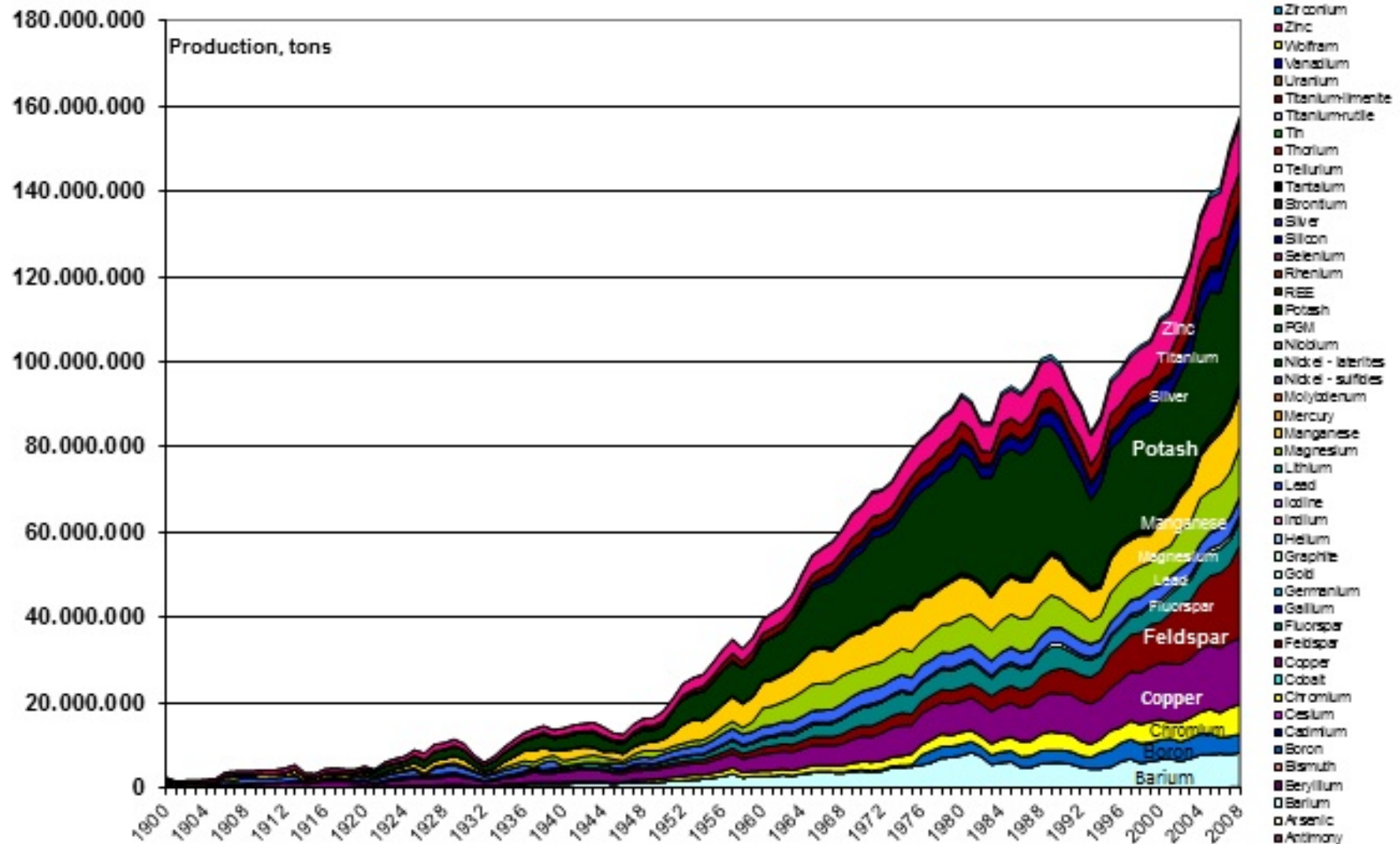
# Nuevos materiales para la Economía “Verde”



# Economía Verde o economía multicolor?

- **Tecnologías IC  $\leftrightarrow$  PGM, Au, Sn, Nb, Ta**
- **Biomasa  $\leftrightarrow$  P**
- **Eólica  $\leftrightarrow$  Imanes permanentes Nd, Dy, Pr, Sm y Co**
- **Fotovoltaica  $\leftrightarrow$  In, Te, Ga, Ge, As, Gd**
- **Lámparas de bajo consumo y pantallas : Y, Eu, Tb, In, Sn**
- **Baterías  $\leftrightarrow$  Ni, Mn, Co, Cd, La, Ce, Li**
- **Turbinas de altas prestaciones  $\leftrightarrow$  Co, Nb, V, Re**
- **Automóviles eléctricos  $\leftrightarrow$  La, Imanes permanentes,**
- **SOFC H2  $\leftrightarrow$  Pt, Pd**
- **Catalizadores  $\leftrightarrow$  Pt, La, Ce**
- **Ce para pulir discos duros.**
- **Nuclear  $\leftrightarrow$  In, Hf, Re, Zr, U**

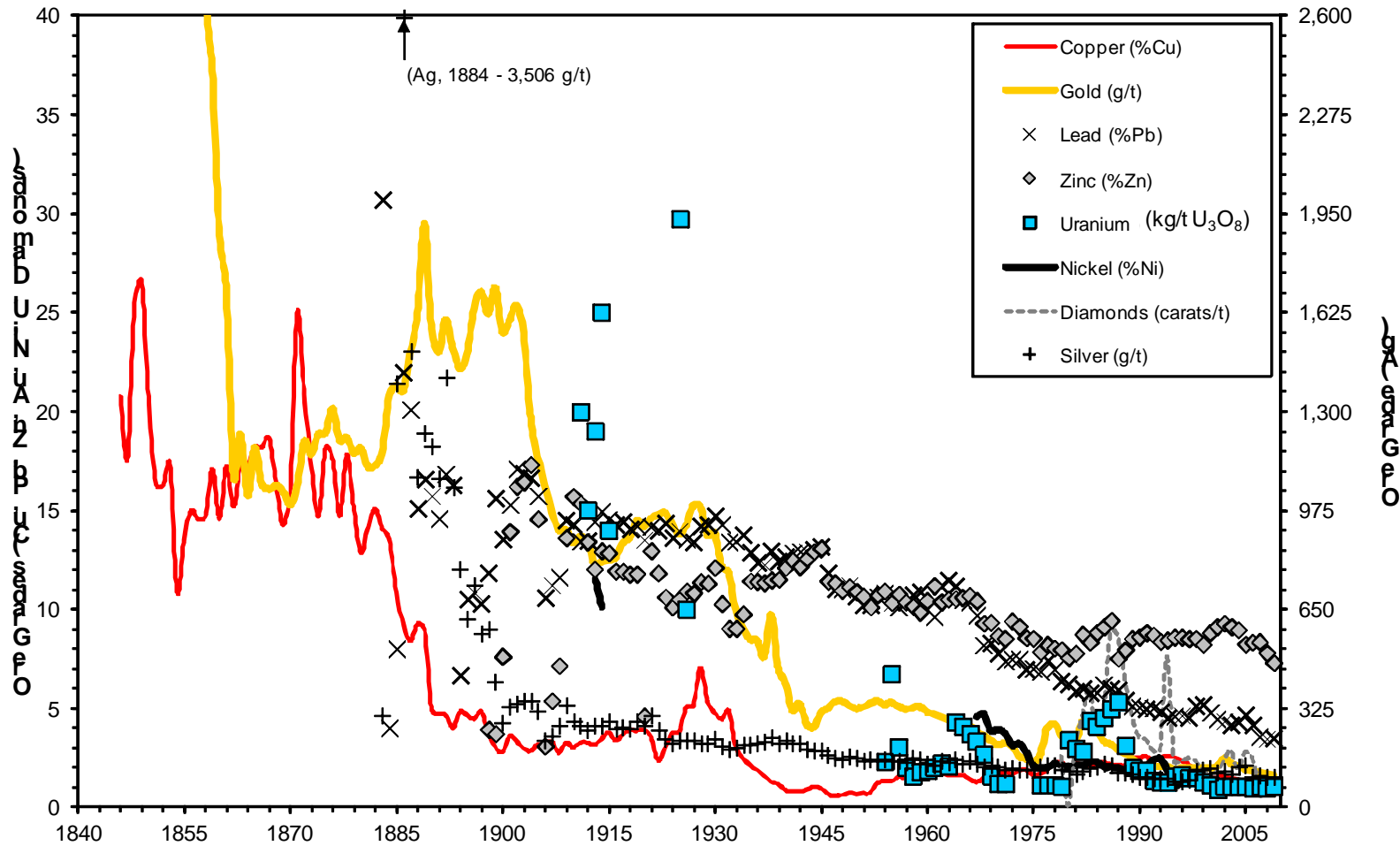
# Consumo exponencial de minerales



Source: A. Valero and A. Valero (2014) . Thanatia: the Destiny of the Earth's mineral resources. World Scientific Publishing

# Las leyes minerales están decreciendo

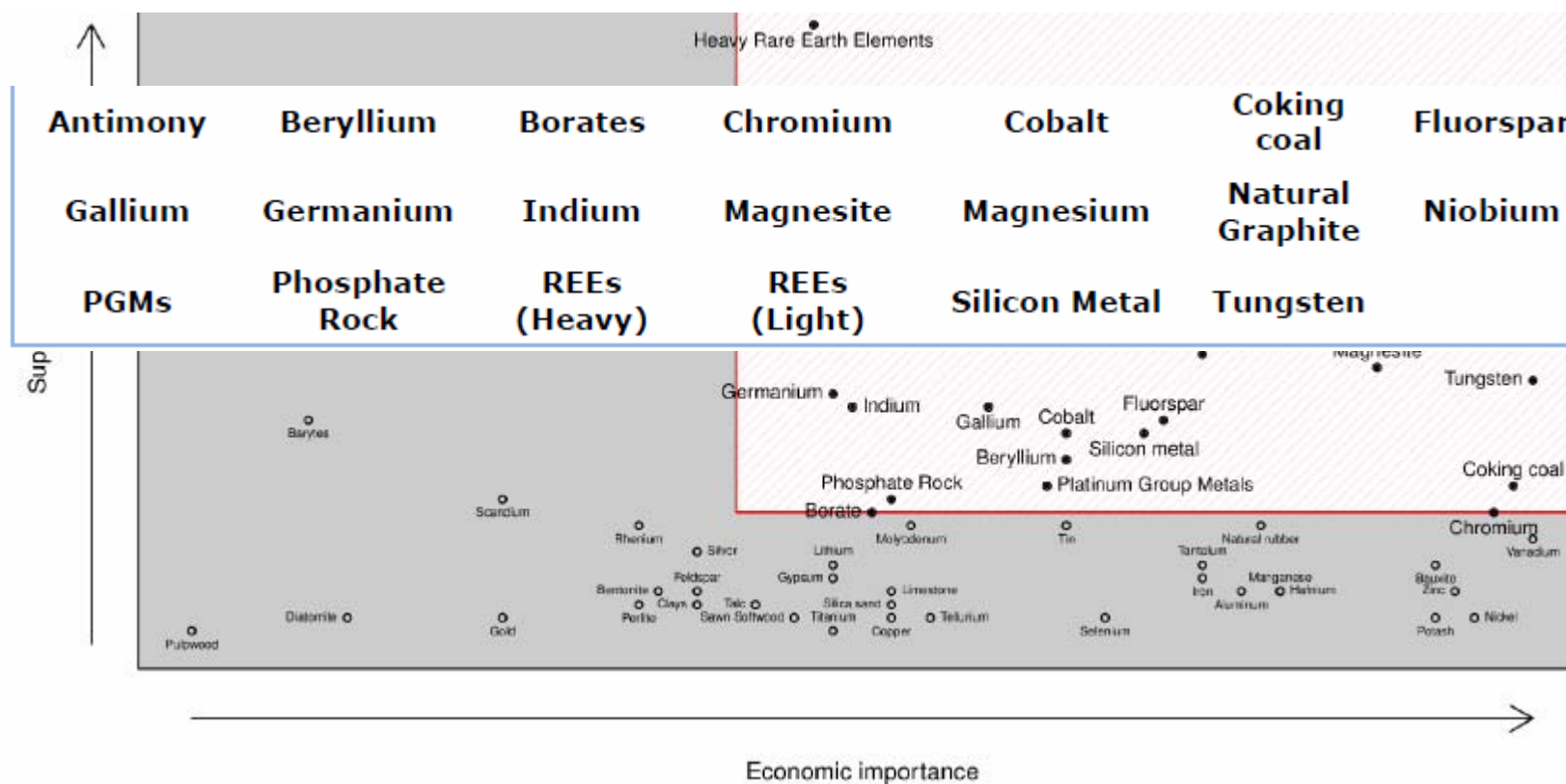
## Decrecimiento de leyes en recursos australianos



Source: Mudd, G. The Ultimate Sustainability of Mining – Linking Key Mega-Trends with 21st Century Challenges Sustainable mining conference, 2010



# Materiales críticos para la UE



Source: EC (2014). Critical Raw materials for the EU



# ... Pero muy poco se recicla

## Specialty metals recycling rates are below 1%!!

(Int. Resource Panel: Graedel et al, 2011)

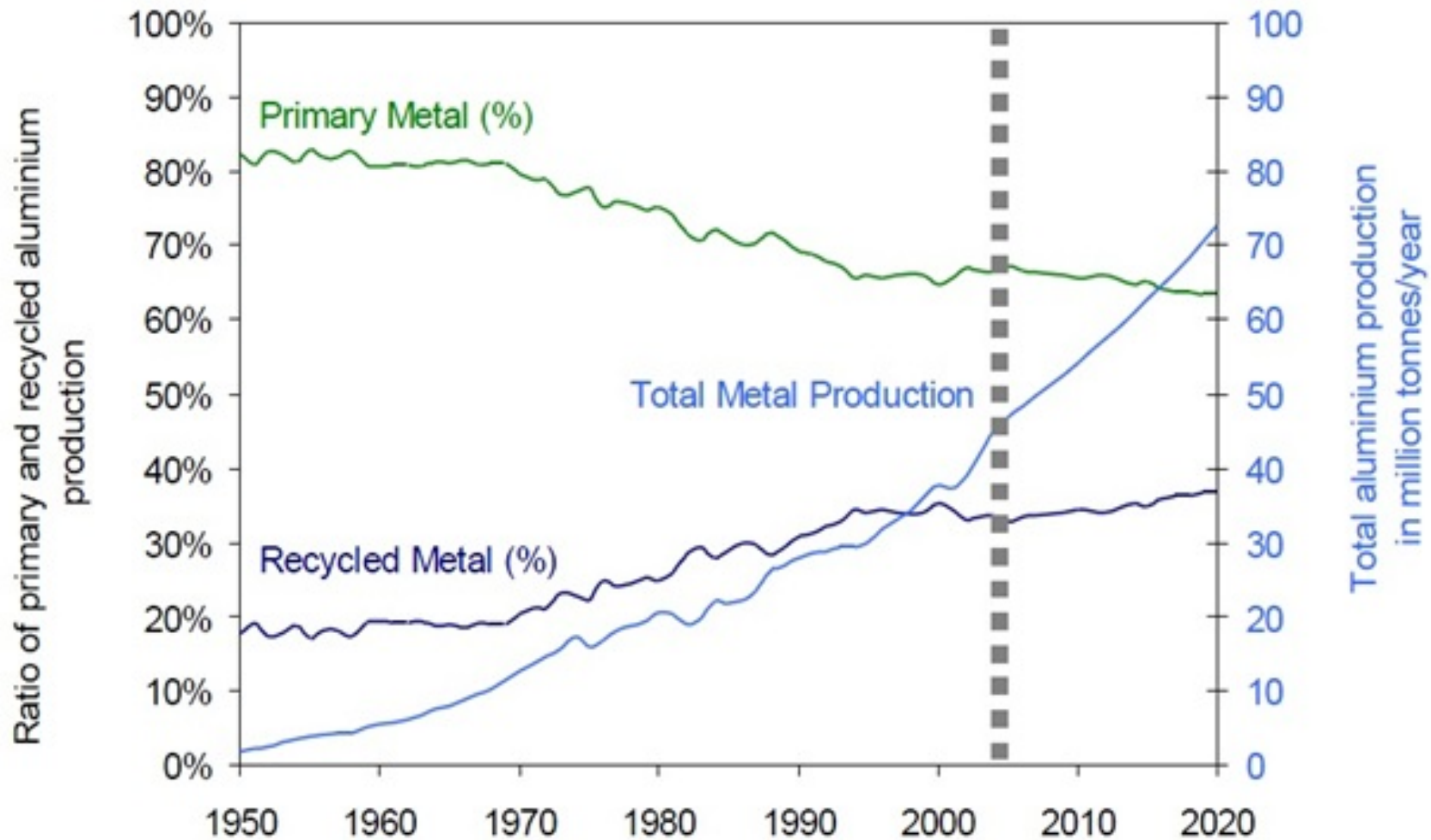
1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Uub	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	(117) (Uus)	118 Uuo
* Lanthanides			57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
** Actinides			89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr



Source: Graedel et al. (2011) What Do We Know About Metal Recycling Rates? *Journal of Industrial Ecology*, 15, 355-366

**Un 2% de aumento en la demanda anual implica duplicar la extracción cada 35 años =extracción histórica**

10



Source: Gerber (2007): Strategy towards the red list from a business perspective

From availability to accessibility - insights into the results of an expert workshop on "mineral raw material scarcity"



## En resumen...

---

- **La demanda de todos los elementos (especialmente los críticos) está aumentando exponencialmente.**
- **Las leyes minerales están decreciendo exponencialmente.**
- **El reciclado es demasiado bajo para casi todos los elementos.**
- **Incluso reciclando el 100%, no se llegaría a satisfacer la demanda.**

## Cuestiones...

---

- **¿Cómo es posible que no exista una contabilidad global para la degradación de los minerales críticos y valiosos del planeta?**
- **¿Cómo puede ayudar la Termodinámica a entender el problema del agotamiento mineral?**



# **2. LA TERMODINÁMICA COMO LA ECONOMÍA DE LA MATERIA**

# Nicholas Georgescu-Roegen y el Segundo Principio

- “The Entropy Law itself emerges as the most economic in nature of all natural laws... the economic process and the Entropy Law is only an aspect of a more general fact, namely, that **this law is the basis of the economy of life at all levels. . .**”

N. Georgescu-Roegen. The Entropy Law and the Economic Process (1971)



**Sin embargo el segundo principio sólo se usa de forma metafórica. Las ideas nunca se convierten en números!**

Entrevista de A. Valero con N. Georgescu-Roegen en 1991  
<http://habitat.aq.upm.es/boletin/n4/aaval.html>

# Principios termodinámicos vs. Económicos

## Primer principio:

**El dinero puede imprimirse de la nada, los kWh no!**

**Corolario: El dinero no es un indicador de agotamiento apropiado.**

## Segundo principio:

**La actividad puede generar beneficios, pero siempre destruye recursos (irreversibilidad)**

**Corolario: En un planeta con recursos limitados, un crecimiento infinito es imposible.**

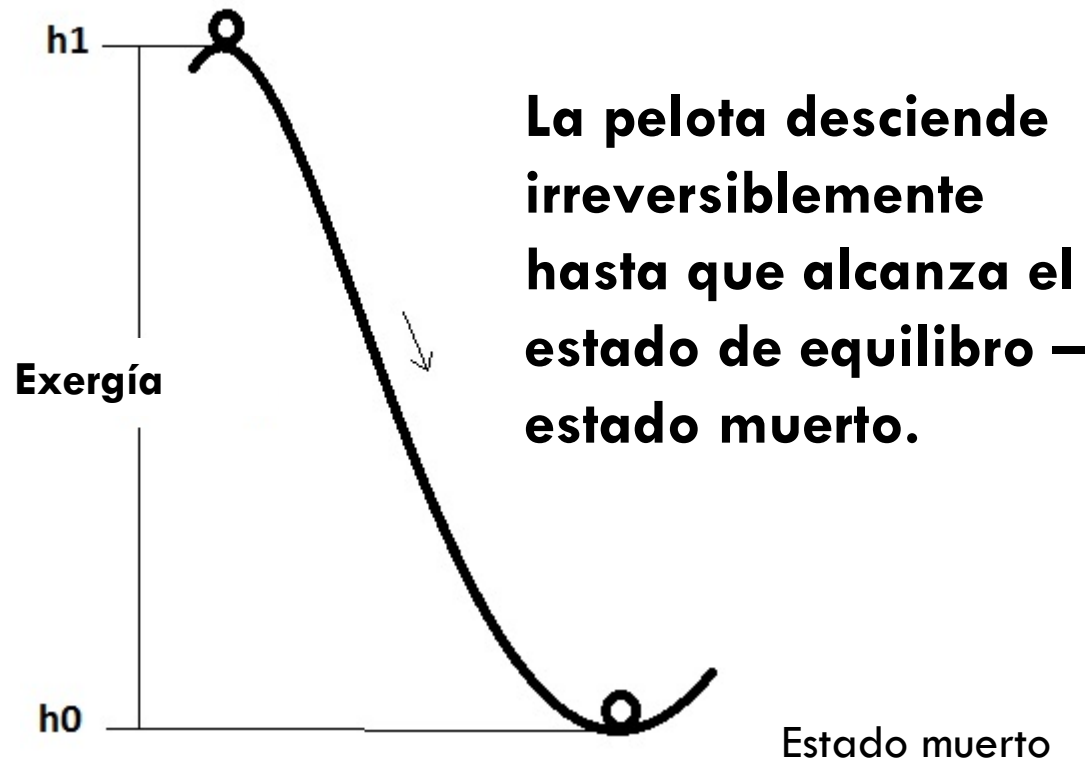
## **2º Ppio sí, pero cambiando la propiedad (indicador)**

- **Entropía es una medida del desorden [kJ/K] => propiedad abstracta**
- **La exergía es una medida de la distinción [kJ]**

**La exergía es una medida de la rareza de un objeto respecto del ambiente que lo rodea. Cuanto más rara es una cosa, mayor es su apreciación. La exergía mide de forma precisa en términos energéticos, la distinción de un objeto respecto de un ambiente de referencia dado.**



# Algunas ideas básicas de Termodinámica



- **Un río, un glaciar, una mina tiene exergía, ¿pero respecto a qué?**





# **3. THANATIA Y EL SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA**

# THANATIA como posible estado muerto de los recursos minerales

20

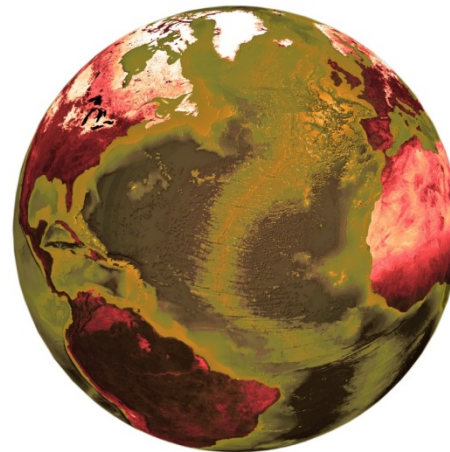
- **Suponeros que imaginamos un posible estado de la Tierra, donde todos los recursos minerales comerciales se hubiesen extraído y dispersado.**
- **Llamémoslo Thanatia del griego “θάνατος” representando la muerte (estado muerto)**
- **Cuál sería la composición de la corteza?**



# El modelo Thanatia: la tierra crepuscular

## La corteza de Thanatia

- La corteza continental superior puede aproximarse a la composición mineralógica media de la tierra. Compuesta por los alrededor de 300 minerales más comunes.
  - Todos los recursos se han extraído y dispersado
  - Todos los combustibles se han quemado



# El modelo Thanatia: la tierra crepuscular

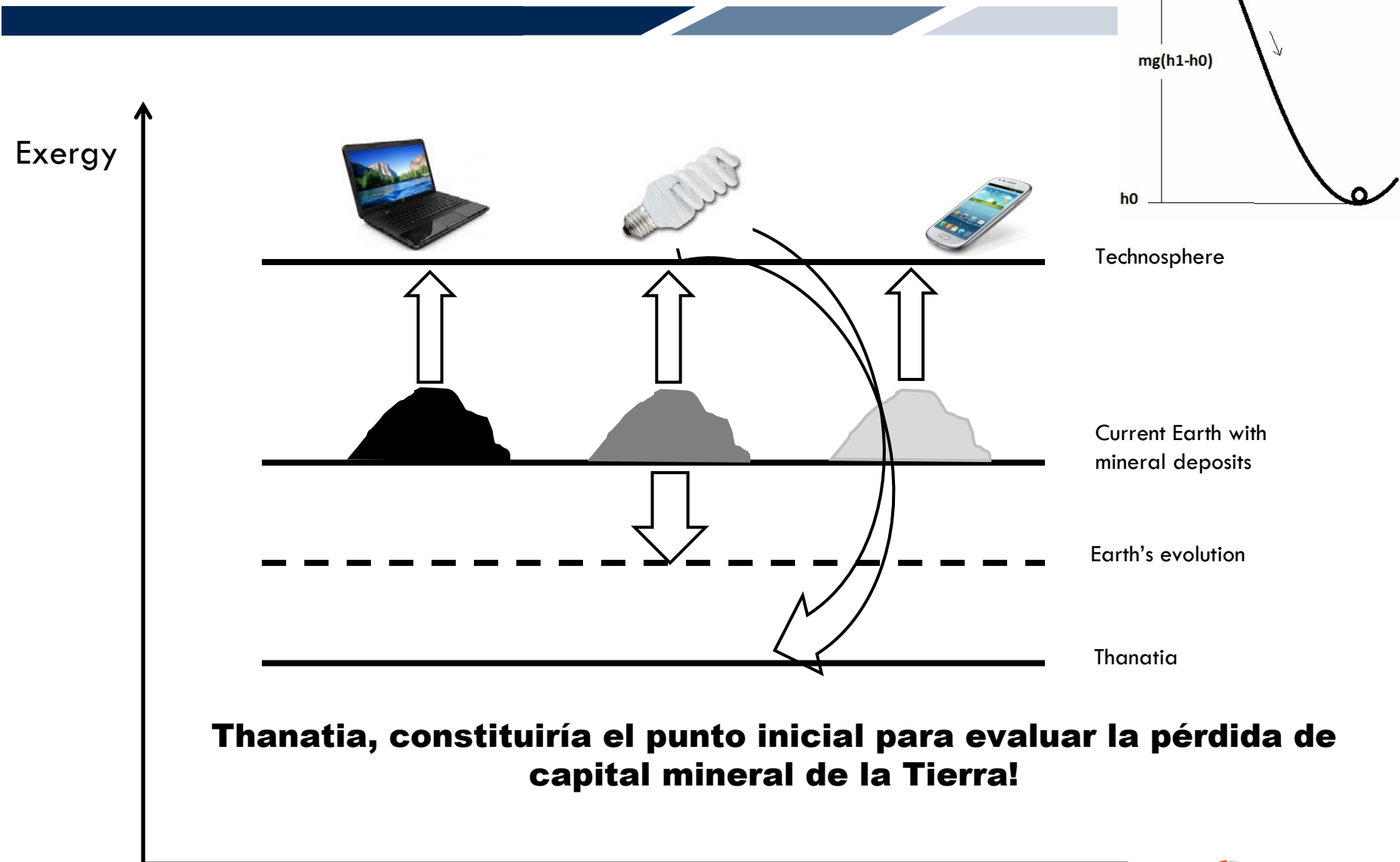
Name	Abundance, mass %	Name	Abundance, mass %	Name	Abundance, mass %
Quarz	2,29E+01	Forsterite	6,96E-03	Helvine/ Helvite	8,05E-05
Albite	1,35E+01	Hedenbergite	6,82E-03	Strontianite	7,88E-05
Oligodase	1,19E+01	Chalcopyrite	6,64E-03	Dispersed Tb	7,00E-05
Orthoclase	1,18E+01	Phlogopite	6,62E-03	Peroovskite	6,94E-05
Andesine	5,46E+00	Witherite	5,99E-03	Tridymite	6,30E-05
Paragonite	3,96E+00	Pentlandite	5,75E-03	Cryolite	4,95E-05
Biotite	3,82E+00	Cordierite	5,57E-03	Sulphur	4,72E-05
Hydromuscovite/ Illite	3,03E+00	Pyrolusite	4,90E-03	Orpiment	4,55E-05
Augite	3,00E+00	Fayalite	4,77E-03	Brookite	4,21E-05
Hornblende (Fe)	2,63E+00	Anatase	4,46E-03	Eudialyte	4,04E-05
Labradorite	2,50E+00	Francolite	4,35E-03	Carnallite	4,03E-05
Nonttronite	1,93E+00	Toumaline	4,30E-03	Xenotime	3,70E-05
Opal	1,24E+00	Orthite-Ce / Allanite	4,05E-03	Dawsonite	3,62E-05
Ripidolite	1,20E+00	Lepidolite	3,99E-03	Wolframite	3,21E-05
Almandine	1,04E+00	Gedrite	3,23E-03	Dispersed Lu	3,10E-05
Muscovite	1,01E+00	Beryl	3,22E-03	Dispersed Tm	3,00E-05
Sillimanite	9,97E-01	Pyrophyllite	3,22E-03	Stibnite	2,75E-05
Epidote	9,06E-01	Rhodonite	3,04E-03	Copper	2,48E-05
Kaolinite	8,36E-01	Magnesite	3,02E-03	Cerussite	2,21E-05
Calcite	8,00E-01	Chloritoid	3,00E-03	Blomstrandite/ Betafite	2,05E-05
Magnetite	7,95E-01	Ilmenorutile	2,96E-03	Sodalite	1,98E-05
Riebeckite	5,74E-01	Ulexite	2,92E-03	Britholite	1,71E-05
Beidellite	5,10E-01	Diadochic Ce	2,83E-03	Ferrotantalite	1,58E-05
Ilmenite	4,71E-01	Jacobsite	2,72E-03	Ramsayite/ Lorenzenite	1,24E-05
Titanite	4,46E-01	Clementite	2,64E-03	Anglesite	1,16E-05
Clinocllore	4,37E-01	Kemite	2,61E-03	Greenockite	1,16E-05
Sepiolite	3,48E-01	Bastnasite	2,54E-03	Chondrodite	1,12E-05
Aegirine	3,04E-01	Colemanite	2,46E-03	Axinite -Fe	1,10E-05

Source: Valero D., A.; Valero, A. & Gómez, J. B. The crepuscular planet. A model for the exhausted continental crust Energy, 2011, 36, 694 – 707;

Valero, A.; Agudelo, A. & Valero D., A. The Crepuscular Planet. Part I: A model for the exhausted atmosphere Proceedings of ECOS 2009, 2009



# La exergía de los recursos minerales




**Thanatia, constituiría el punto inicial para evaluar la pérdida de capital mineral de la Tierra!**

# ¡Nos estamos aproximando hacia Thanatia!





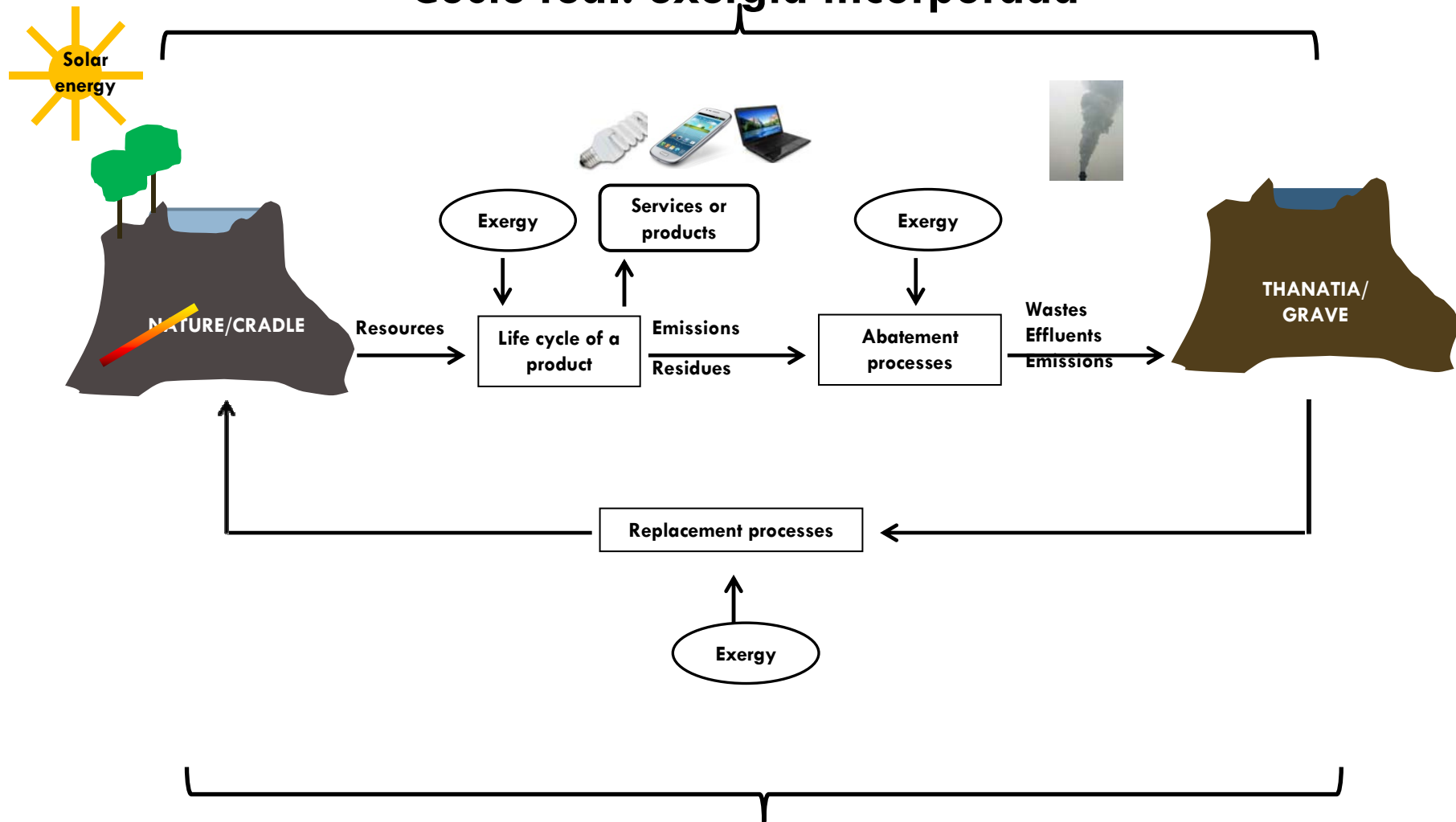


# **4. Aplicaciones del 2º**

## **Principio para la evaluación de los recursos minerales**

# CUNA A LA TUMBA

Coste real: exergía incorporada

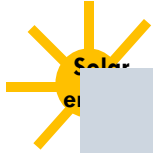


# TUMBA A LA CUNA

Coste oculto: Coste exergético de reposición

## CUNA A LA TUMBA

Coste real: exergía incorporada

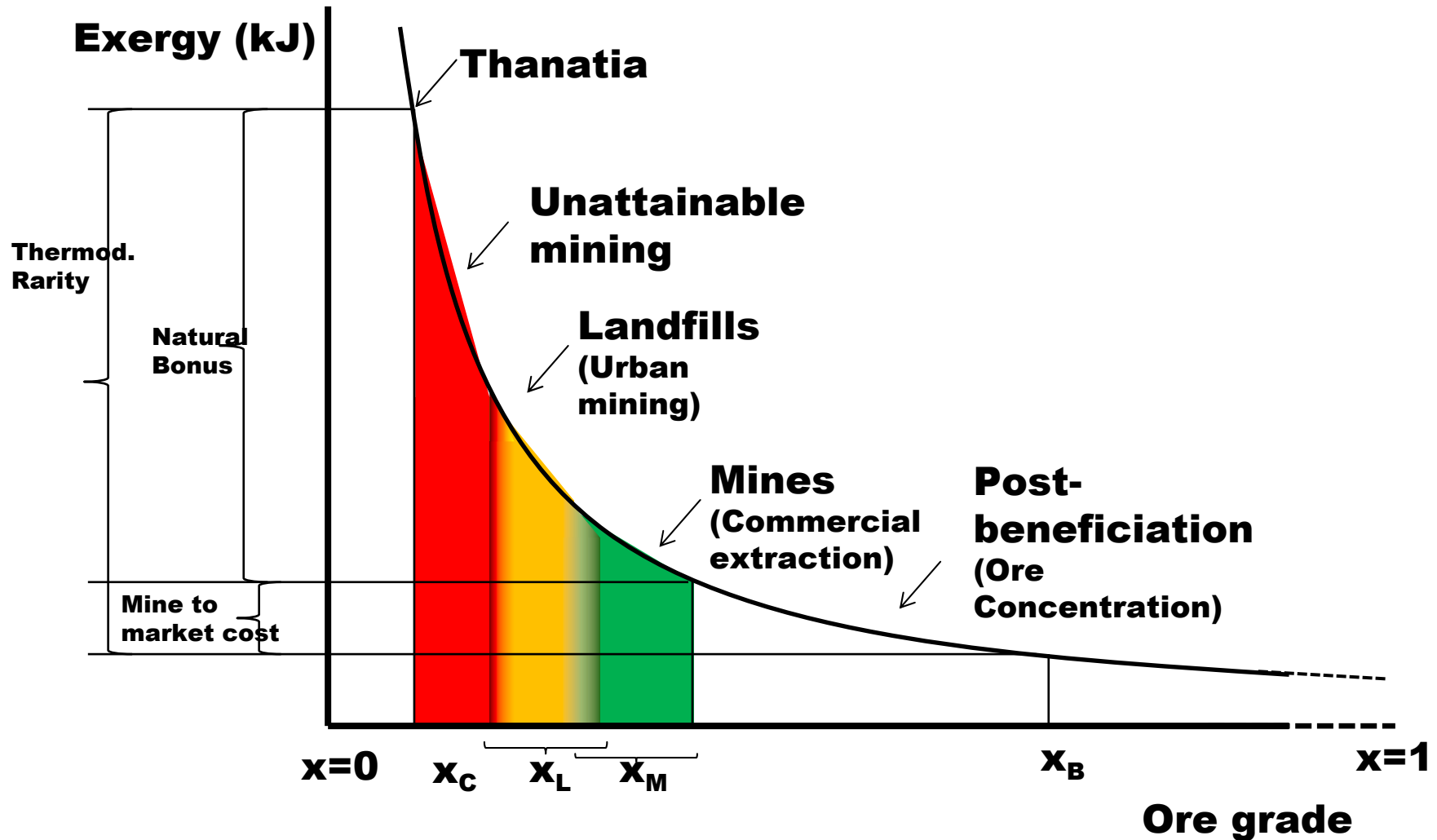


**¿Cuánto costaría producir un determinado producto desde Thanatia?**

## TUMBA A LA CUNA

Coste oculto: Coste exergético de reposición

# Aplicación Nr. 1: Rareza termodinámica



# Aplicación Nr. 1: Rareza termodinámica

**Cuanto más escaso y más difícil sea extraer un mineral, mayor es su rareza y mayor es la pérdida de riqueza mineral cuando se haya dispersado.**

1

**Ore grade**



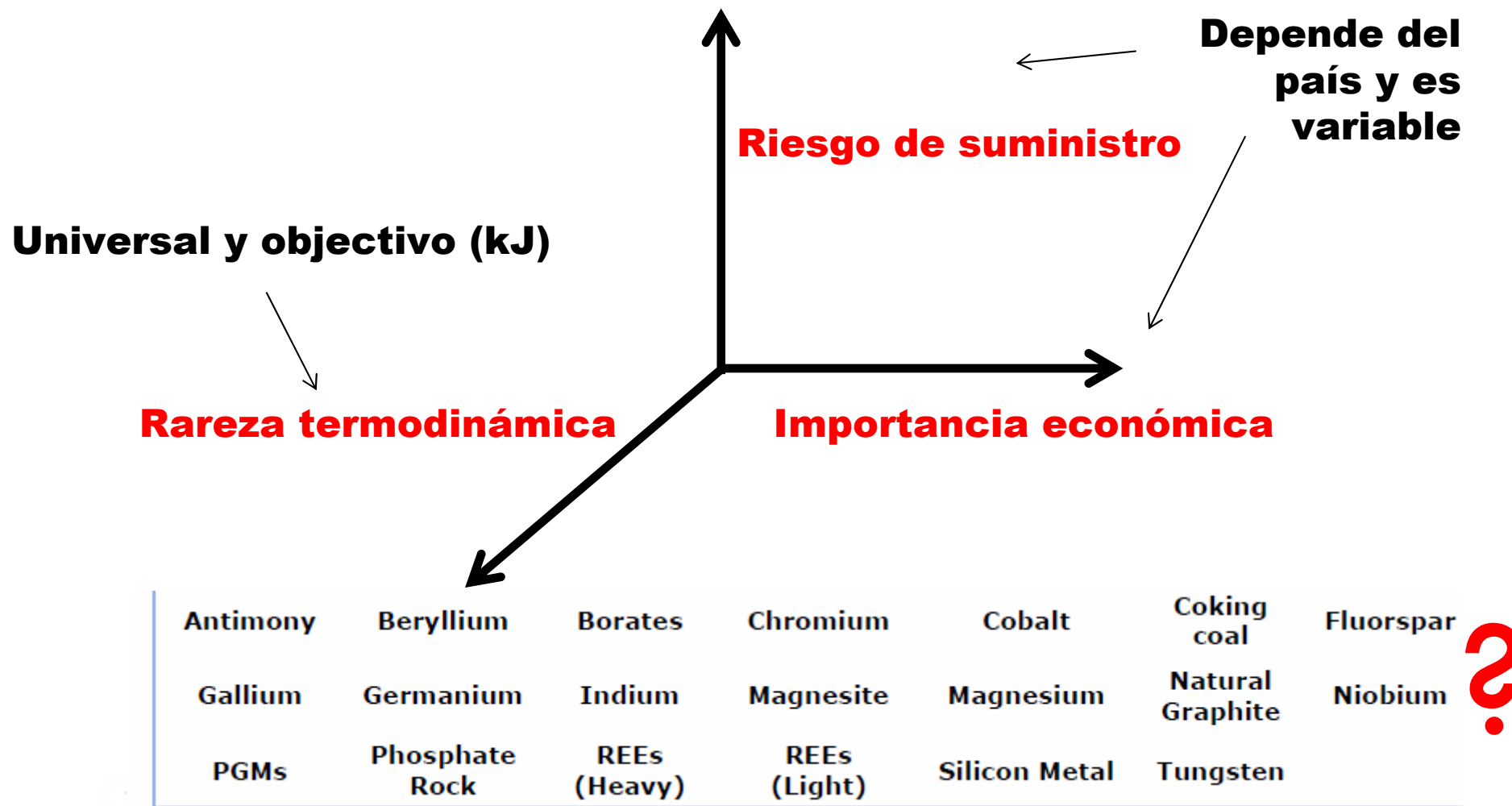
# Rareza termodinámica de algunos elementos. En construcción <sup>30</sup>

H																	He
Li 558	Be 260											B	C	N	O	F	Ne
Na 47	Mg											Al 638	Si 1	P 1	S	Cl	Ar
K 1,227	Ca 3	Sc	Ti 23	V 1,191	Cr 5	Mn 16	Fe 18	Co 10881	Ni 776	Cu 139	Zn 26	Ga 754,828	Ge 24,247	As 409	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y 1,357	Zr 1,393	Nb	Mo 1,043	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag 8,652	Cd 6,162	In 363,917	Sn 442	Sb 445	Te 2,825,065	I	Xe
Cs	Ba 39	La 336	Hf	Ta 485,910	W 7,642	Re 103,087	Os	Ir	Pt	Au 691,420	Hg 28,455	Tl	Pb 37	Bi 493	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Uun	Uuu	Uub	Uut	Uuq	Uup	Uuh	Uus	Uuo

Ce 620	Pr 873	Nd 670	Pm	Sm	Eu	Gd 4,085	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Th	Pa	U 1,090	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

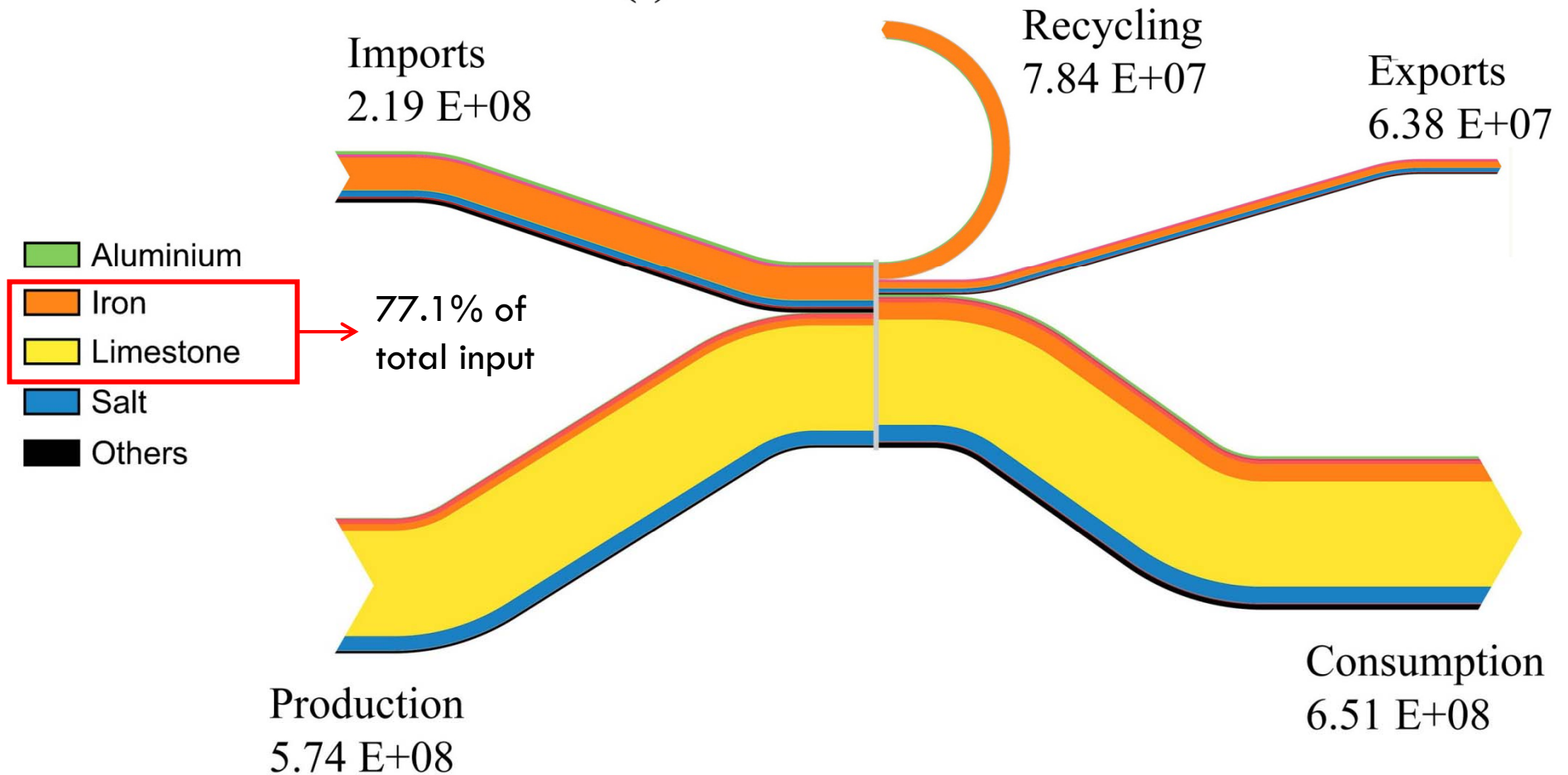
	>10,000 GJ/t
	10,000-1,000 GJ/t
	1,000-100 GJ/t
	<100 GJ/t

# Una nueva dimensión en la evaluación de la criticidad de minerales



# Aplicación Nr. 2: Análisis de flujo de materiales

Diagrama de Sankey para el balance mineral de la UE sin combustibles fósiles (2011) [ton]

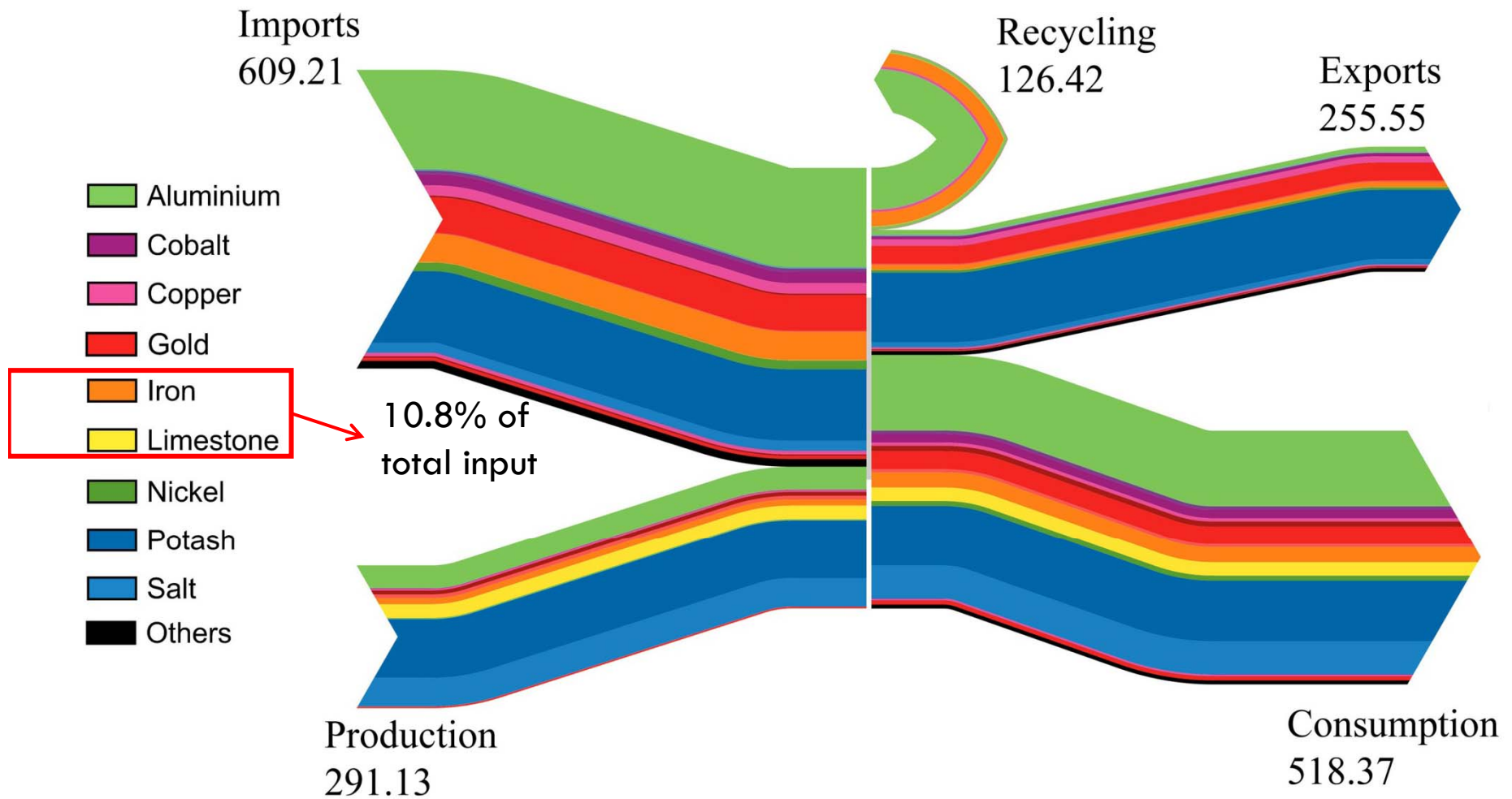




# Aplicación Nr. 2: Análisis de flujo de materiales

Diagrama de rareza para el balance mineral de la UE sin combustibles fósiles (2011) [Mtoe]

1



# Aplicación Nr. 2: Análisis de flujo de materiales

Diagrama de rareza para el balance mineral de la UE sin combustibles fósiles (2011) [Mtoe]

1

- **Prestando atención a la calidad y no sólo la cantidad de los recursos.**

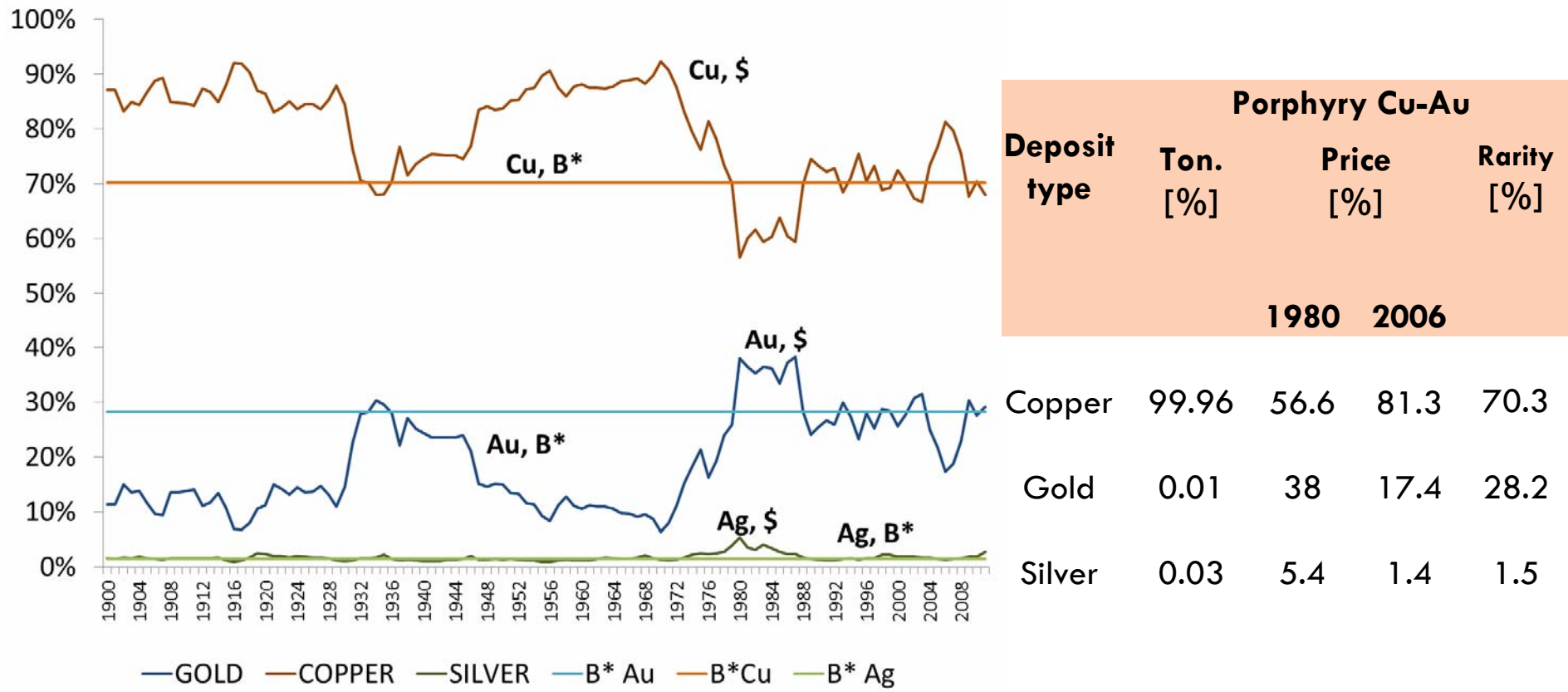
- **Ayuda a orientar políticas de eficiencia en el uso de recursos:**

- **Indicadores utilizados en base másica como DMC/GDP => basados en “exergía”.**
- **Objetivos de reciclado, como la Directiva RAES (objetivo de reciclado del 85%), no sólo deberían ir enfocados hacia el reciclaje del Aluminio o Hierro!**

Production  
291.13

Consumption  
518.37

# Aplicación Nr. 3: Asignación de costes



Source: A. Valero, A. Domínguez and A. Valero (2015). Exergy cost allocation of by-products in the mining and metallurgical industry. Resources, Conservation and Recycling, 102: 128-142

## Aplicación Nr. 3: Asignación de costes

100%

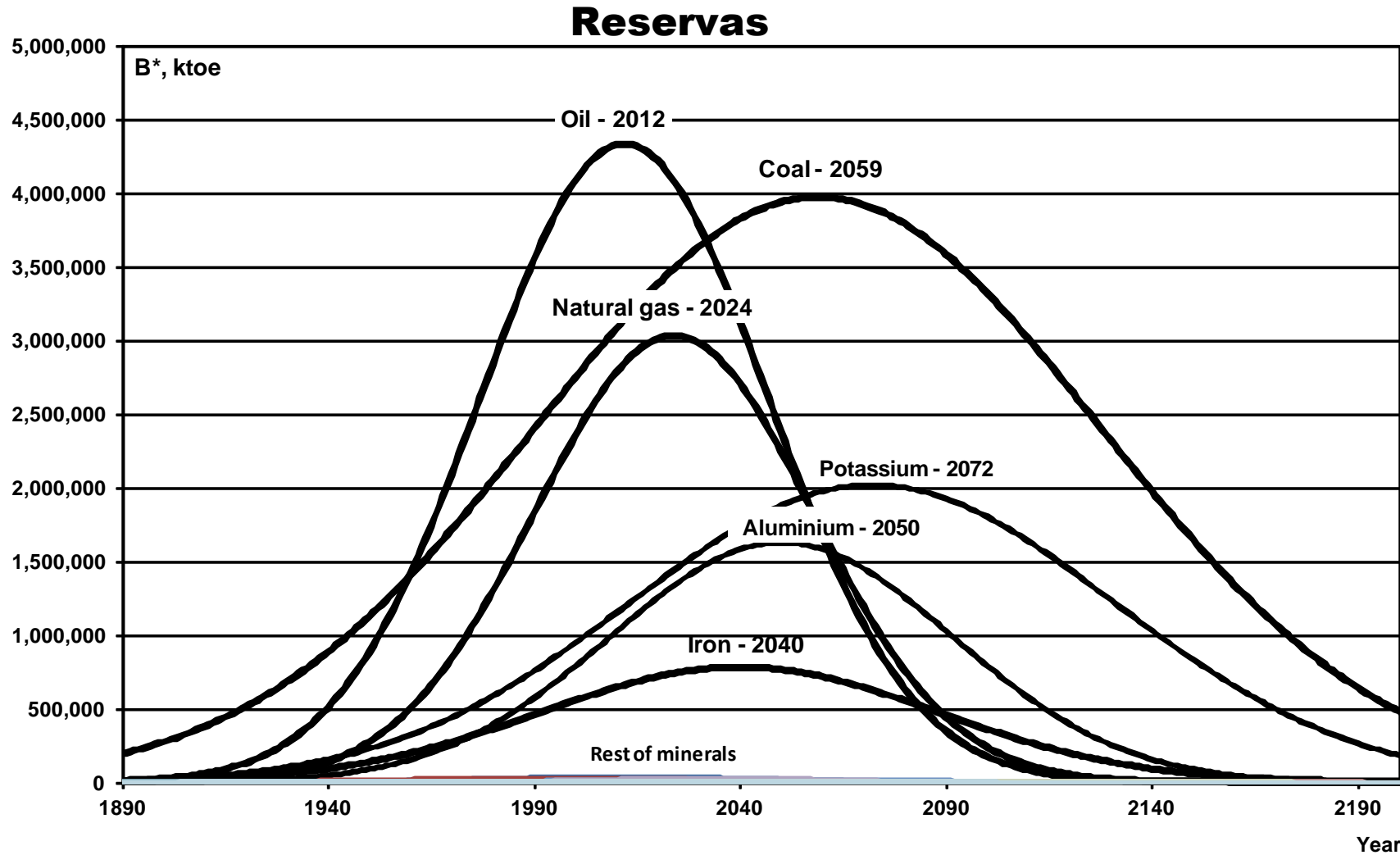
**La rareza puede utilizarse para asignar costes a co-productos.**

**Sorprendentemente, proporciona un valor objetivo y absoluto cercano a los precios de las MMPP**

**Aplicación financiera!?**

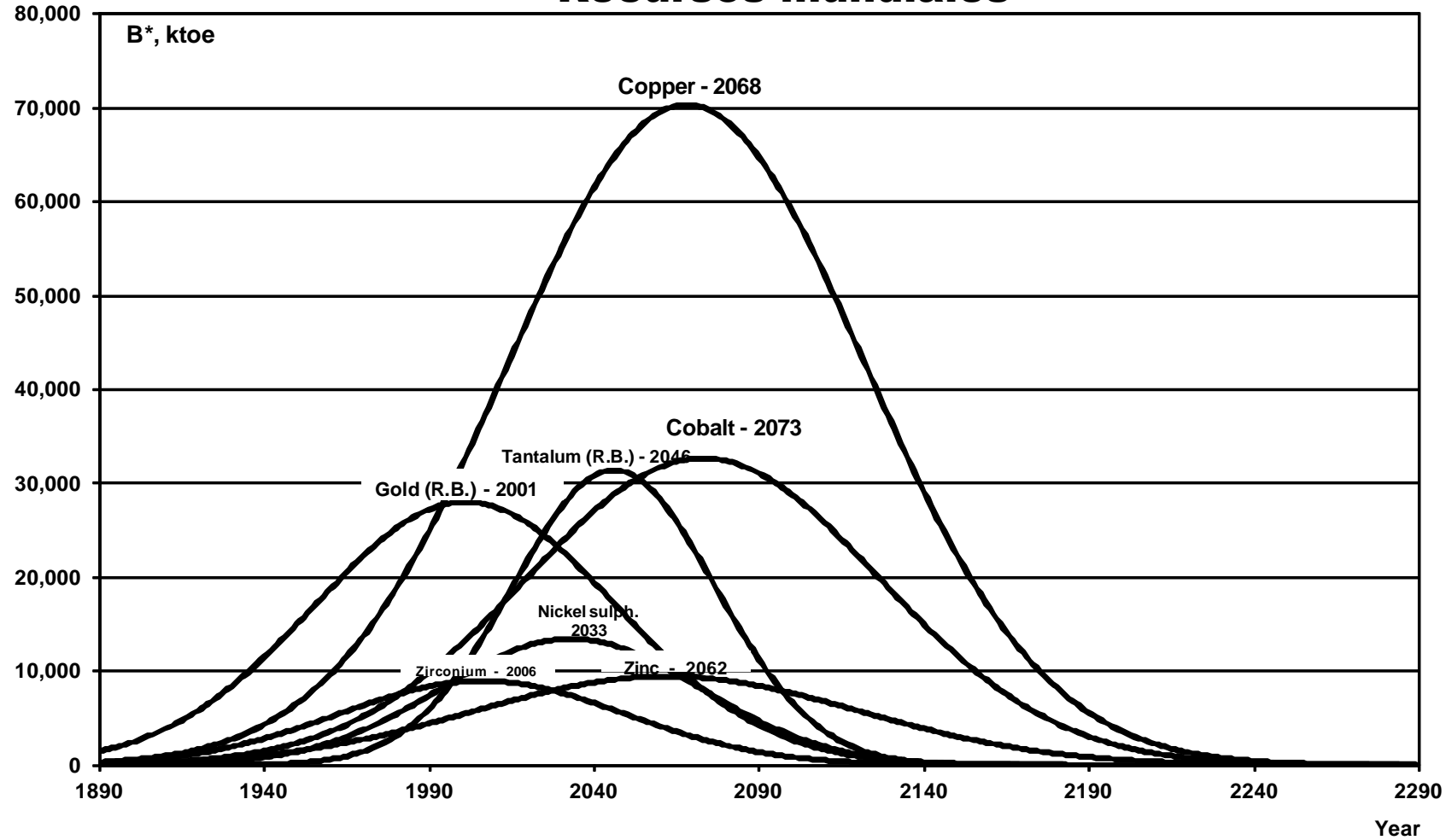
Source: A. Valero, A. Domínguez and A. Valero (2015). Exergy cost allocation of by-products in the mining and metallurgical industry. Resources, Conservation and Recycling, 102: 128-142

# Aplicación Nr. 4: Cuenta atrás exérgica



# Aplicación Nr. 4: Cuenta atrás exérgica

## Recursos mundiales



Source: A. Valero and A. Valero (2014) . Thanatia: the Destiny of the Earth's mineral resources. World Scientific Publishing



	Theoretical Data				Empirical Data
	Reserves Peak	\$R^2\$	W.R. Peak	\$R^2\$	Observed Peak
Mercury	1960	0.56	1965	0.18	1971
Tin	1979	0.53	1986	0.63	2007
Silver	1995	0.44	1999	0.52	-
Gold	1994	0.65	2001	0.74	2001
Antimony	1998	0.56	2006	0.64	-
Zirconium	2003	0.89	2006	0.89	-
Oil	2012	0.97	2027	0.97	2008 (2011)
Lithium	2015	0.86	2033	0.89	-
Nickel laterites	2017	0.98	2033	0.98	-
Nickel sulphides	2017	0.98	2033	0.98	-
Wolfram	2007	0.89	2006	0.87	-
Molybdenum				0.95	2004
Bismuth				0.86	-
Tantalum				0.85	-
Rhenium				0.94	-
Uranium				0.70	2006
Zinc				0.98	-
Copper				0.98	-
Natural gas				1.00	-
Ti-rutile	2028	0.89	2069	0.86	-
Cobalt	2042	0.87	2073	0.88	-
Cadmium	1996	0.98	2076	0.90	-
Phosphate rock	2031	0.92	2080	0.89	-
REE	2092	0.98	2104	0.98	-
Ti-ilmenite	2040	0.96	2082	0.96	-
Beryllium			2082	0.40	-
Aluminium	2050	0.98	2088	0.98	-
Lead	1989	0.82	2110	0.82	-
Iron	2040	0.91	2115	0.92	-
Manganese	2007	0.87	2119	0.81	-
Vanadium	2067	0.83	2129	0.83	-
Chromium	2015	0.96	2149	0.97	-
Coal	2059	0.95	2159	0.95	-
Arsenic	1971	0.29	2159	0.31	-
Potassium	2072	0.91	2272	0.88	-

**Considerar recursos en vez de reservas desplaza el pico en 50 años de media**

El pico de los recursos podría aparecer antes de que termine el s. XXI!



	Theoretical Data				Empirical Data
	Reserves Peak	\$R^2\$	W.R. Peak	\$R^2\$	Observed Peak
Mercury	1960	0.56	1965	0.18	1971
Tin	1979	0.53	1986	0.63	2007
Silver	1995	0.44	1999	0.52	-
Gold	1994	0.65	2001	0.74	2001
Antimony	1998	0.56	2006	0.64	-
Zirconium	2003	0.89	2006	0.89	-
Oil	2012	0.97	2027	0.97	2008 (2011)
Lithium	2015	0.86	2033	0.89	-
Nickel laterites	2017	0.98	2033	0.98	-
Nickel sulphides	2017	0.98	2033	0.98	-
Wolfram	2007	0.89	2036	0.87	-
Molybdenum	2018	0.95	2040	0.95	2004
Bismuth	2015	0.87	2042	0.86	-
Tantalum	2034	0.85	2046	0.85	-
Rhenium	2022	0.95	2054	0.94	-
Uranium	2033	0.72	2061	0.70	2006
Zinc	1999	0.92	2062	0.98	-
Copper	2012	0.95	2068	0.98	-
Natural gas	2024	1.00	2069	1.00	-
Ti-rutile	2028	0.89	2069	0.86	-
Cobalt	2042	0.87	2073	0.88	-
Cadmium	1996	0.98	2076	0.90	-
Phosphate rock	2031	0.92	2080	0.89	-
REE	2092	0.98	2104	0.98	-
Ti-ilmenite	2040	0.96	2082	0.96	-
Beryllium			2082	0.40	-
Aluminium	2050	0.98	2088	0.98	-
Lead	1989	0.82	2110	0.82	-
Iron	2040	0.91	2115	0.92	-
Manganese	2007	0.87	2119	0.81	-
Vanadium	2067	0.83	2129	0.83	-
Chromium	2015	0.96	2149	0.97	-
Coal	2059	0.95	2159	0.95	-
Arsenic	1971	0.29	2159	0.31	-
Potassium	2072	0.91	2272	0.88	-

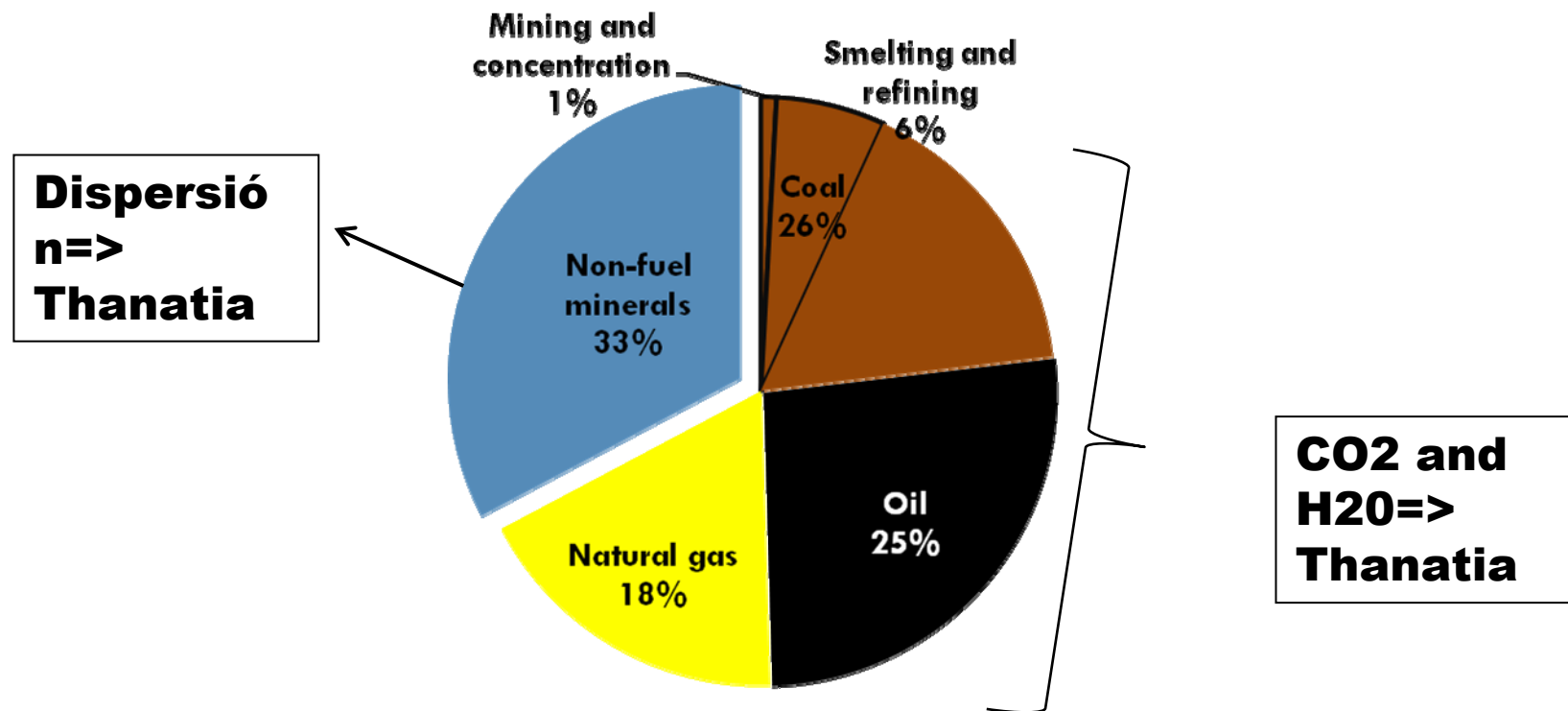
Source: A. Valero and A. Valero (2014) . Thanatia: the Destiny of the Earth's mineral resources. World Scientific Publishing





# Una visión del 2º Ppio sobre recursos minerales:41 la cesta de “uso y pérdida”

- ¿Cuánto es la pérdida exérgica asociada a la dispersión mineral?



## Cuestiones...



- **¿Cómo es posible que no se realicen cuentas globales de la degradación de los recursos críticos y valiosos?**

# Aplicación Nr. 5: SETEA: Adenda al sistema de cuentas económico-ambientales<sup>43</sup>

- **La contabilidad convencional no da cuenta de la dispersión (deudas a la Naturaleza).**
- **PIB y otros indicadores económicos no tienen en cuenta el hecho de que las futuras generaciones no tendrán disponibles minerales concentrados.**
- **Proponemos pues una adenda al “system of environmental economic accounts” de las NNUU basado en la termodinámica: (System of Environmental-Thermo-Economic Accounting).**

**¿Nos apoyaríais en esta propuesta?**

# Llamamiento a la UE y NNUU

- **Calling for a better preservation of the Earth's resources endowment and the use of the laws of Thermodynamics for the assessment of energy and material resources as well as the planet's dissipation of energy.**

Climate change and mineral resource depletion are two of the major challenges humanity is faced with, and are interlinked. The United Nations comprehensively addressed the former a few decades ago by setting up the United Nations Program for Environment and the Framework Convention on Climate Change, of which the International Panel on Climate Change is an offspring. The above initiative can be seen as response model, which mobilises the scientific community so as to provide ideas, tools, propositions, *etc* in the combat against climate change.

The depletion of mineral ores and of energy resources (as illustrated by the consumption of non-recycled rare earths and other minor metals), meanwhile, has become a major concern more recently since there is a growing awareness that it threatens present-day human civilization.

Signed by 31 scientists. International Journal of Thermodynamics. 16(3), 2013

# Llamamiento a la UE y NNUU

- **Calling for a better preservation of the Earth's resources endowment and the use of the laws of Thermodynamics for the assessment of energy and material resources as well as the planet's dissipation of energy.**

**¿Lo firmaríais?**

**[aliciavd@unizar.es](mailto:aliciavd@unizar.es)**

Climate  
humani  
address  
for Env  
Internat  
be seen  
provide

The dep  
consumption of non-recycled rare earths and other minor metals), meanwhile, has become a major concern more recently since there is a growing awareness that it threatens present-day human civilization.

allenges  
ensively  
Program  
which the  
tive can  
so as to  
ge.



# 5. REFLEXIONES FINALES

- 1) Nuestro planeta se dirige hacia el agotamiento mineral (las mejores minas ya se han extraído y sus minerales dispersados en la biosfera)**

**Esto no es fatalismo sino ciencia. Termodinámica**

**2) Esta progresión es irreversible, y la acción humana la está acelerando.**

**Volver al estado inicial sólo podría realizarse con la acción del Sol y el calor interno de la Tierra durante eones.**





## **3) Esta progresión podría desacelerarse con una gestión apropiada de los recursos abióticos.**

**Se necesita una visión y decisiones globales. Desafortunadamente estas necesidades están alejadas del pensamiento político actual.**

**4) “Eficiencia y suficiencia” ambas son necesarias, esto implica que “Tecnología y Ética” deben ir de la mano.**

**La tecnología no es nunca suficiente y en algunos casos puede ser más destructiva que creativa.**

# Moverse hacia la Re-Economía/ Economía Circular



**Re-duce**

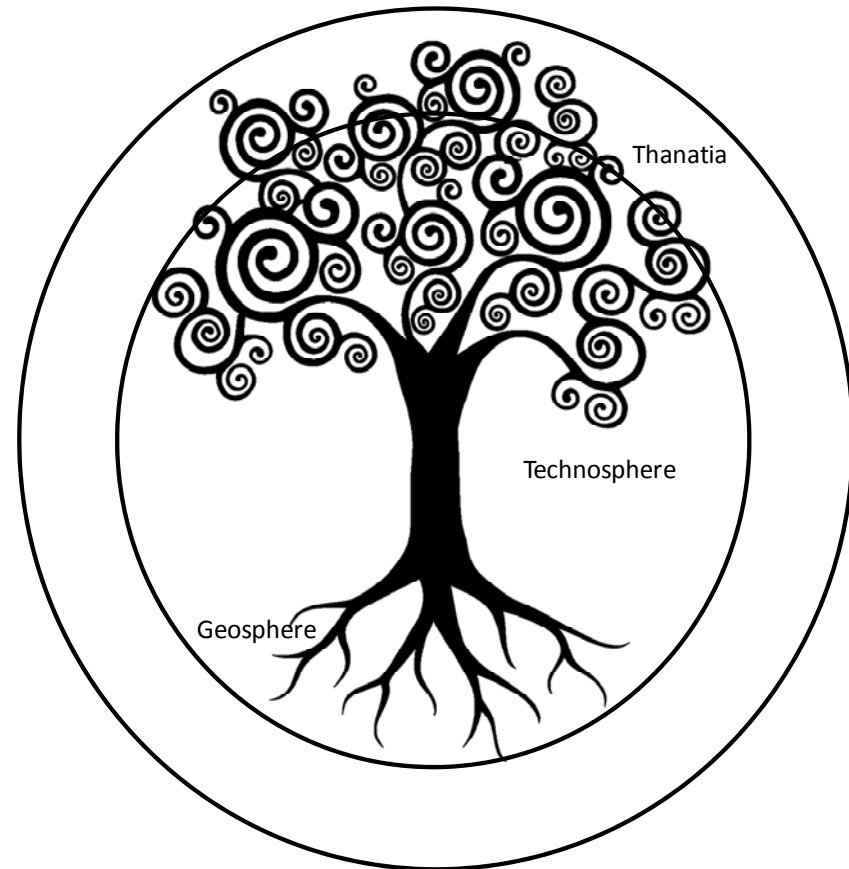
# Move towards the Re-Economy/Circular Economy



**5) La economía circular es un precioso mito, pero el 2º Ppio es inevitable:**

**“En cada ciclo de los materiales algo se pierde porque es inalcanzable el reciclado completo y barato. Sólo podemos aspirar a una economía espiral. Cuantas más espirales, más alejados estamos de llegar a Thanatia.**

**Podemos proponer un árbol fractal para cada elemento**



- **Ha llegado la hora en el que la humanidad debe gestionar adecuadamente sus recursosno renovables, con inteligencia y orden, de tal manera que aunque sean finitos, puedan contabilizarse adecuadamente**

**SE ESTÁ AGOTANDO EL TIEMPO,  
DEMOS LA VUELTA AL RELOJ DE ARENA!!!**



***La sostenibilidad es un viaje, Thanatia un destino!***

Connecting Great Minds

# THANATIA

## THE DESTINY OF THE EARTH'S MINERAL RESOURCES

A Thermodynamic Cradle-to-Cradle Assessment

By Antonio Valero Capilla & Alicia Valero Delgado (CIRCE - Universidad de Zaragoza, Spain)

On youtube (Spanish): <https://www.youtube.com/watch?v=M6qi4bKRPe0>

On youtube (English): <https://www.youtube.com/watch?v=76eUJxPaqFU>



**Preferred Publisher of Leading Thinkers**



# Sede de CIRCE– Campus Río Ebro - Zaragoza

