



¿Puede la industria minera satisfacer la demanda mundial de minerales críticos?

Jeffrey L. Mauk, Jonathan A. Funk, and Nicholas A. Karl

**Servicio Geológico de EE. UU.
Centro de Geología, Geofísica y Ciencias Geoquímicas
Denver, CO 80225 USA**

Asociación de Servicios de Geología y Minería Iberoamericanos - XXIX Asamblea General
Pachuca de Soto, México, 09 abril 2024

04.2020

NATIONAL
GEOGRAPHIC

A Pessimist's
Guide to Life
on Earth in 2070

HOW WE LOST
THE PLANET

HOW WE SAVED
THE WORLD

An Optimist's Guide
to Life on Earth
in 2070

Los recursos de la Tierra proporcionan las materias primas que se necesitan para resolver los mayores problemas de la humanidad

04.2023

NATIONAL
GEOGRAPHIC

8
BILLION

THE POPULATION PARADOX

With some countries expanding and others declining,
are we nearing peak population?



Preliminary information, subject to revision, not for citation or distribution

¿Puede la industria minera satisfacer la demanda mundial de minerales críticos?

La respuesta correcta versus la mejor respuesta



Preliminary information, subject to revision, not for citation or distribution

Nuestro enfoque: demanda y luego oferta

Law of Supply and Demand



If price **increases**:

If price **decreases**:

Supply

Demand



<https://www.universalcpareview.com/ask-joeey/what-is-the-law-of-supply-and-demand/>

Fortiers: Cuantificación de la demanda

- Traducido libremente del francés, un Fortier es una fortaleza
- Los yacimientos con dotaciones de uno o más Fortiers pueden ayudar a fortalecer a la humanidad al ayudar a satisfacer la necesidad de minerales críticos y otros productos básicos



Fortiers: Cuantificación de la demanda

1 Fortier de EE.UU. = promedio de 5 años de consumo de un producto básico en EE.UU.

1 Fortier global = promedio de 5 años de producción mundial anual de un producto básico

Producción \approx consumo



Fortiers

Producto	Fortier de EE.UU. (consumo)	Fortier Global (producción)
Utilizamos los valores de consumo y producción promediados durante los últimos 5 años, sin tener en cuenta futuros aumentos		
Be	1.9×10^2	2.4×10^2

*Consumo y producción en toneladas métricas
Compilado a partir de los resúmenes de productos minerales del USGS*



Preliminary information, subject to revision, not for citation or distribution

Tamaño del depósito: estadísticas (Singer, 1995)

		Oro	Plata	Cobre	Zinc	Plomo
Gigante (10% superior)	Toneladas métricas	100	2,400	2,000,000	1,700,000	1,000,000
	Porcentaje de metal total	86	79	84	71	73
Supergigante (1% superior)	Toneladas métricas	1,200	22,000	24,000,000	12,000,000	7,000,000
	Porcentaje de metal total	57	37	34	25	30

Valores de los productos en toneladas métricas

Singer, D.A., 1995. World class base and precious metal deposits; a quantitative analysis.

Economic Geology, v. 90, no. 1, p. 88-104.



Preliminary information, subject to revision, not for citation or distribution

Tamaño del depósito: abundancia en la corteza terrestre (Laznicka, 2014)

Elemento	Clarke (ppm)	Grande	Gigante	Supergigante
Ag	7.0×10^{-2}	7.0×10^2	7.0×10^3	7.0×10^4
Al	8.0×10^4	8.0×10^8	8.0×10^9	8.0×10^{10}
As	1.7×10^0	1.7×10^4	1.7×10^5	1.7×10^6
Au	2.5×10^{-3}	2.5×10^1	2.5×10^2	2.5×10^3
Be	2.4×10^0	2.4×10^4	2.4×10^5	2.4×10^6

Valores de los productos en toneladas métricas
 Laznicka, P., 2014. Giant metallic deposits—A century of progress.
 Ore Geology Reviews, v. 62, p. 259-314.



Preliminary information, subject to revision, not for citation or distribution

Tamaño del depósito: abundancia en la corteza terrestre (Laznicka, 2014)

← Grande → ← Gigante → ← Supergigante →

Elemento	Clarke (ppm)	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto
Ag	7.0×10^{-2}	7.0×10^2	2.8×10^3	4.9×10^3	7.0×10^3	2.8×10^4	4.9×10^4	7.0×10^4	2.8×10^5	4.9×10^5
Al	8.0×10^4	8.0×10^8	3.2×10^9	5.6×10^9	8.0×10^9	3.2×10^{10}	5.6×10^{10}	8.0×10^{10}	3.2×10^{11}	5.6×10^{11}
As	1.7×10^0	1.7×10^4	6.8×10^4	1.2×10^5	1.7×10^5	6.8×10^5	1.2×10^6	1.7×10^6	6.8×10^6	1.2×10^7
Au	2.5×10^{-3}	2.5×10^1	1.0×10^2	1.8×10^2	2.5×10^2	1.0×10^3	1.8×10^3	2.5×10^3	1.0×10^4	1.8×10^4
Be	2.4×10^0	2.4×10^4	9.6×10^4	1.7×10^5	2.4×10^5	9.6×10^5	1.7×10^6	2.4×10^6	9.6×10^6	1.7×10^7

Valores de los productos en toneladas métricas

Laznicka, P., 2014. Giant metallic deposits—A century of progress.

Ore Geology Reviews, v. 62, p. 259-314.



Preliminary information, subject to revision, not for citation or distribution

Tamaño del depósito: abundancia en la corteza vs. estadísticas

← Grande → Gigante → Supergigante →

Elemento	Clarke (ppm)	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto
Ag	7.0×10^{-2}	7.0×10^2	2.8×10^3	4.9×10^3	7.0×10^3	2.8×10^4	4.9×10^4	7.0×10^4	2.8×10^5	4.9×10^5
Au	2.5×10^{-3}	2.5×10^1	1.0×10^2	1.8×10^2	2.5×10^2	1.0×10^3	1.8×10^3	2.5×10^3	1.0×10^4	1.8×10^4
Cu	2.5×10^1	2.5×10^5	1.0×10^6	1.8×10^6	2.5×10^6	1.0×10^7	1.8×10^7	2.5×10^7	1.0×10^8	1.8×10^8
Pb	1.5×10^1	1.5×10^5	6.0×10^5	1.1×10^6	1.5×10^6	6.0×10^6	1.1×10^7	1.5×10^7	6.0×10^7	1.1×10^8
Zn	6.5×10^1	6.5×10^5	2.6×10^6	4.6×10^6	6.5×10^6	2.6×10^7	4.6×10^7	6.5×10^7	2.6×10^8	4.6×10^8

Yacimientos gigantes de Singer

Yacimientos supergigantes de Singer



Preliminary information, subject to revision, not for citation or distribution

Tamaño del depósito: abundancia en la corteza vs. estadísticas

← Grande → Gigante → Supergigante →

Elemento	Fortier EE. UU.	Fortier Global	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto
Ag	6.9×10^3	2.6×10^4	7.0×10^2	2.8×10^3	4.9×10^3	7.0×10^3	2.8×10^4	4.9×10^4	7.0×10^4	2.8×10^5	4.9×10^5
Au	1.8×10^2	3.2×10^3	2.5×10^1	1.0×10^2	1.8×10^2	2.5×10^2	1.0×10^3	1.8×10^3	2.5×10^3	1.0×10^4	1.8×10^4
Cu	1.8×10^6	2.0×10^7	2.5×10^5	1.0×10^6	1.8×10^6	2.5×10^6	1.0×10^7	1.8×10^7	2.5×10^7	1.0×10^8	1.8×10^8
Pb	1.6×10^6	4.6×10^6	1.5×10^5	6.0×10^5	1.1×10^6	1.5×10^6	6.0×10^6	1.1×10^7	1.5×10^7	6.0×10^7	1.1×10^8
Zn	8.8×10^5	1.2×10^7	6.5×10^5	2.6×10^6	4.6×10^6	6.5×10^6	2.6×10^7	4.6×10^7	6.5×10^7	2.6×10^8	4.6×10^8

Yacimientos gigantes de Singer

Yacimientos supergigantes de Singer



Preliminary information, subject to revision, not for citation or distribution

Consumo anual

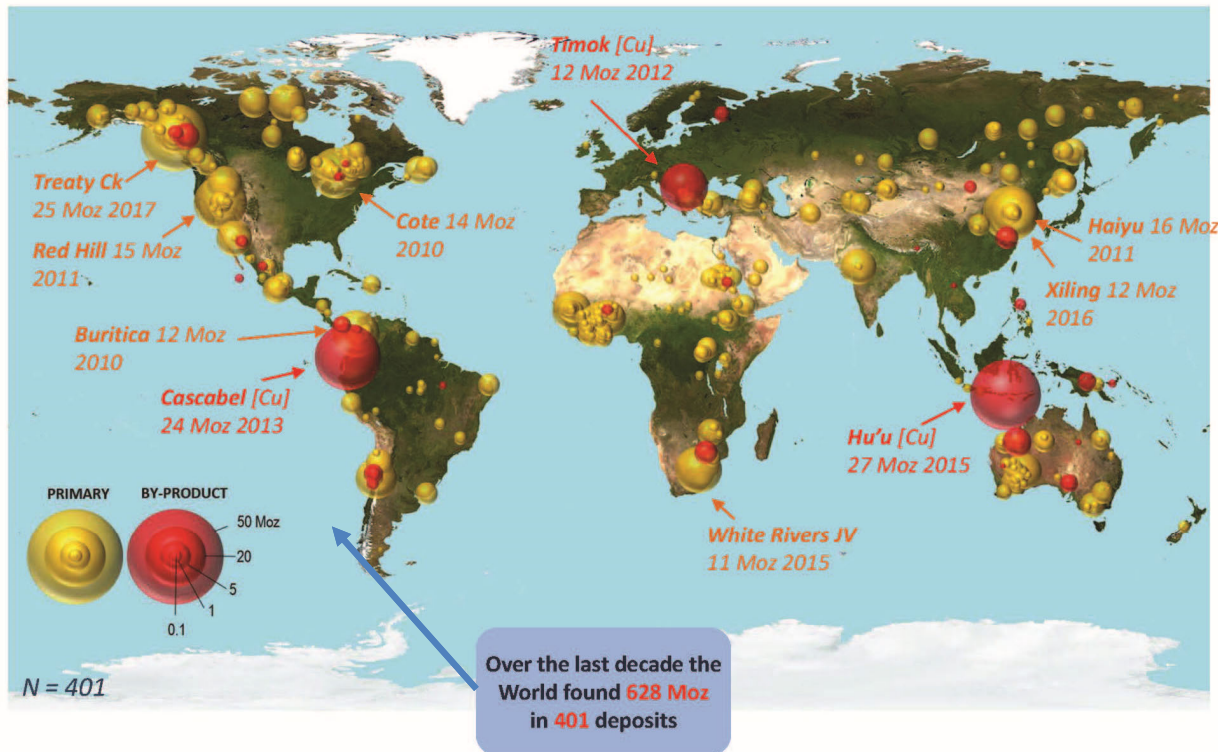
- En el caso de los productos básicos en los que tenemos tanto la abundancia de la corteza como las clasificaciones estadísticas del tamaño de los depósitos, la humanidad está produciendo (y, por inferencia, consumiendo) *cada año*
 - 1 depósito de Ag supergigante
 - 2.5 yacimientos supergigantes de Au
 - Depósitos de Cu supergigante de 0,83
 - 1 depósito de Pb supergigante
 - 1 yacimientos supergigantes de Zn
- Por definición, los depósitos supergigantes son el 1% superior
- Y en una primera aproximación, se necesitan 10 depósitos gigantes para igualar la dotación de 1 depósito supergigante

Suministro

- Cuantificar la capacidad de la industria minera para satisfacer el suministro futuro es más difícil
- Un método consiste en analizar el tamaño de los yacimientos y considerar los plazos de la *apertura de nuevas minas*

Tasa de descubrimiento: Au

Gold discoveries in the World: 2010-Present



- Durante la última década, el mundo encontró 628 Moz Au, que son 20.000 toneladas métricas, o 2.000 toneladas métricas por año
- La producción mundial anual es de 3.100 toneladas métricas

Schodde (2021)

Note: Based on deposits containing >0.1 Moz of gold
No adjustment made for unreported discoveries or likely growth in Resources

Source: MinEx Consulting © April 2021



Preliminary information, subject to revision, not for citation or distribution

Tamaño del depósito: abundancia en la corteza vs. estadísticas

Elemento	← Grande →			← Gigante →			← Supergigante →					
	Fortier EE.UU.	Fortier Global		Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto
Au	1.8×10^2	3.2×10^3		2.5×10^1	1.0×10^2	1.8×10^2	2.5×10^2	1.0×10^3	1.8×10^3	2.5×10^3	1.0×10^4	1.8×10^4

Yacimientos gigantes de Singer

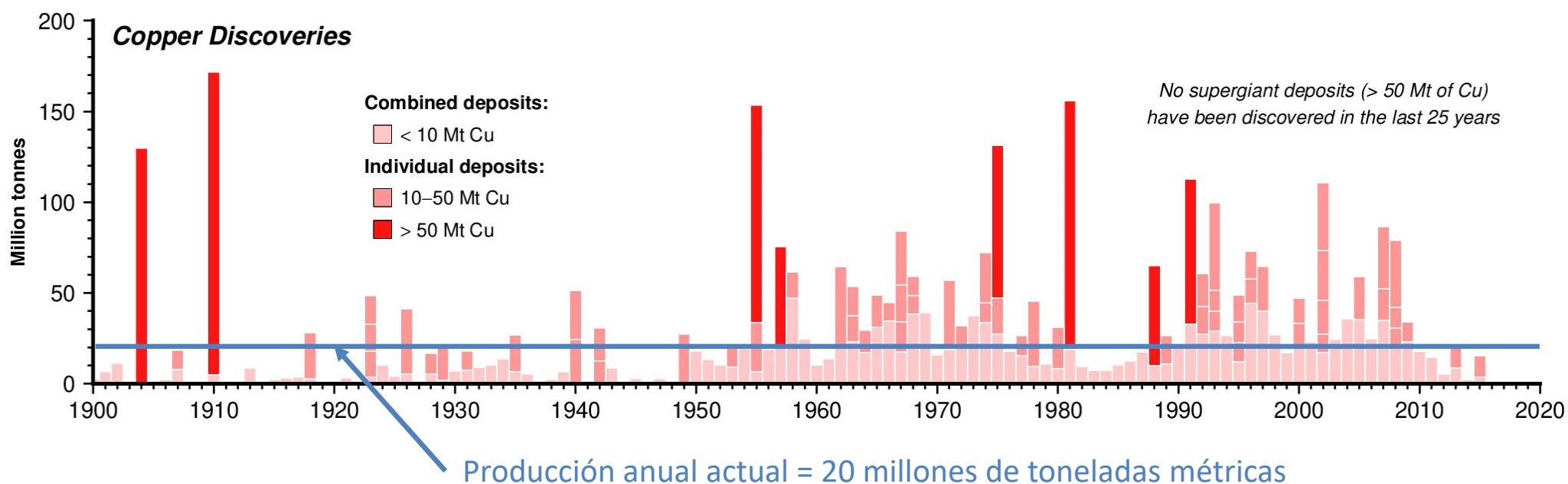
Yacimientos supergigantes de Singer



Preliminary information, subject to revision, not for citation or distribution

Tasa de descubrimiento: Cu

Este diagrama utiliza 50 Mt Cu como punto de corte para la supergigante, mientras que Singer (1995) utilizó 25 Mt Cu



Hoggard (2020)



Preliminary information, subject to revision, not for citation or distribution

Tamaño del depósito: abundancia en la corteza vs. estadísticas

← Grande →
← Gigante →
← Supergigante →

Elemento	Fortier EE.UU.	Fortier Global	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto
Cu	1.8×10^6	2.0×10^7	2.5×10^5	1.0×10^6	1.8×10^6	2.5×10^6	1.0×10^7	1.8×10^7	2.5×10^7	1.0×10^8	1.8×10^8

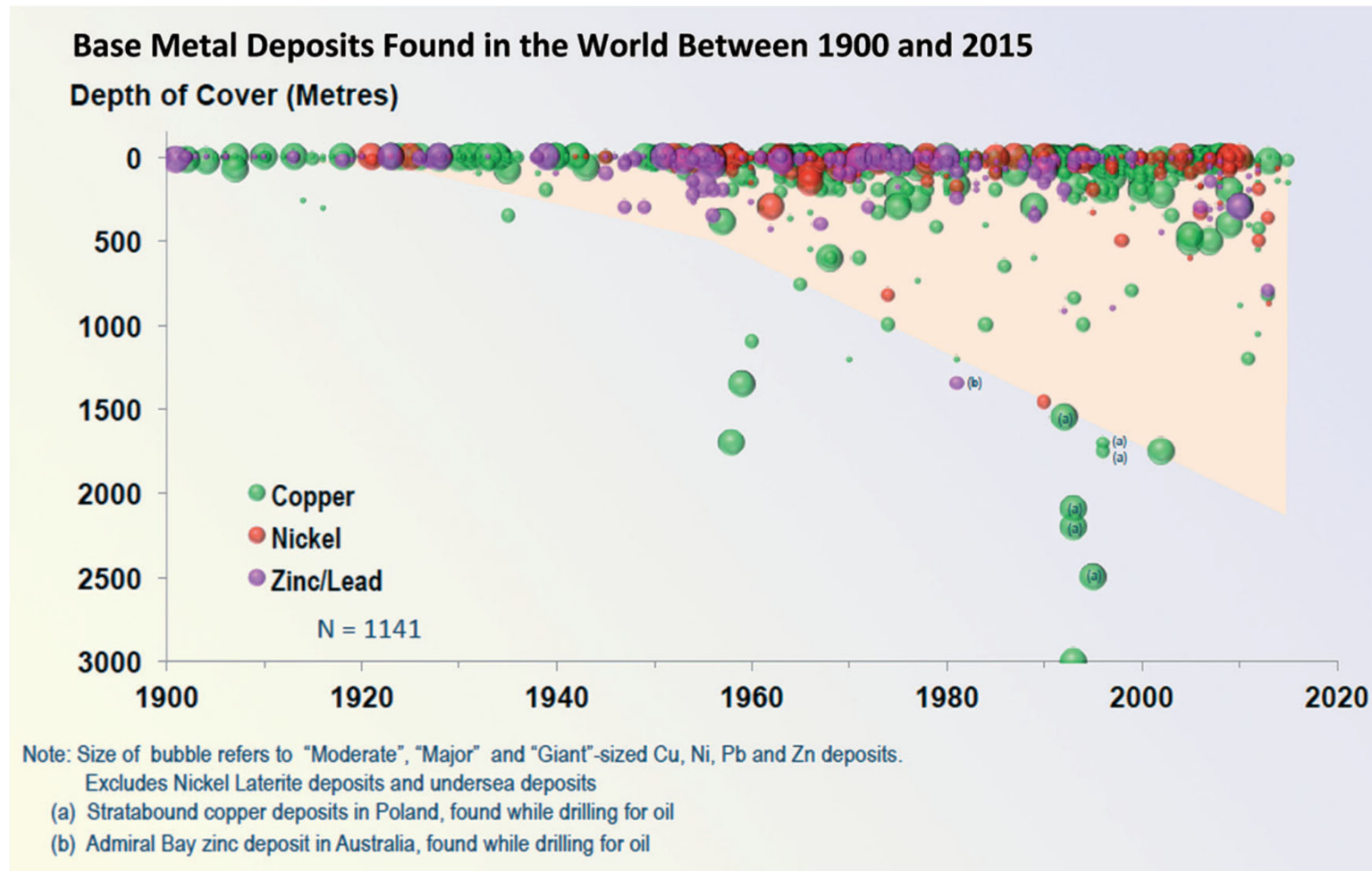
Yacimientos gigantes de Singer

Yacimientos supergigantes de Singer



Preliminary information, subject to revision, not for citation or distribution

Profundidad del descubrimiento

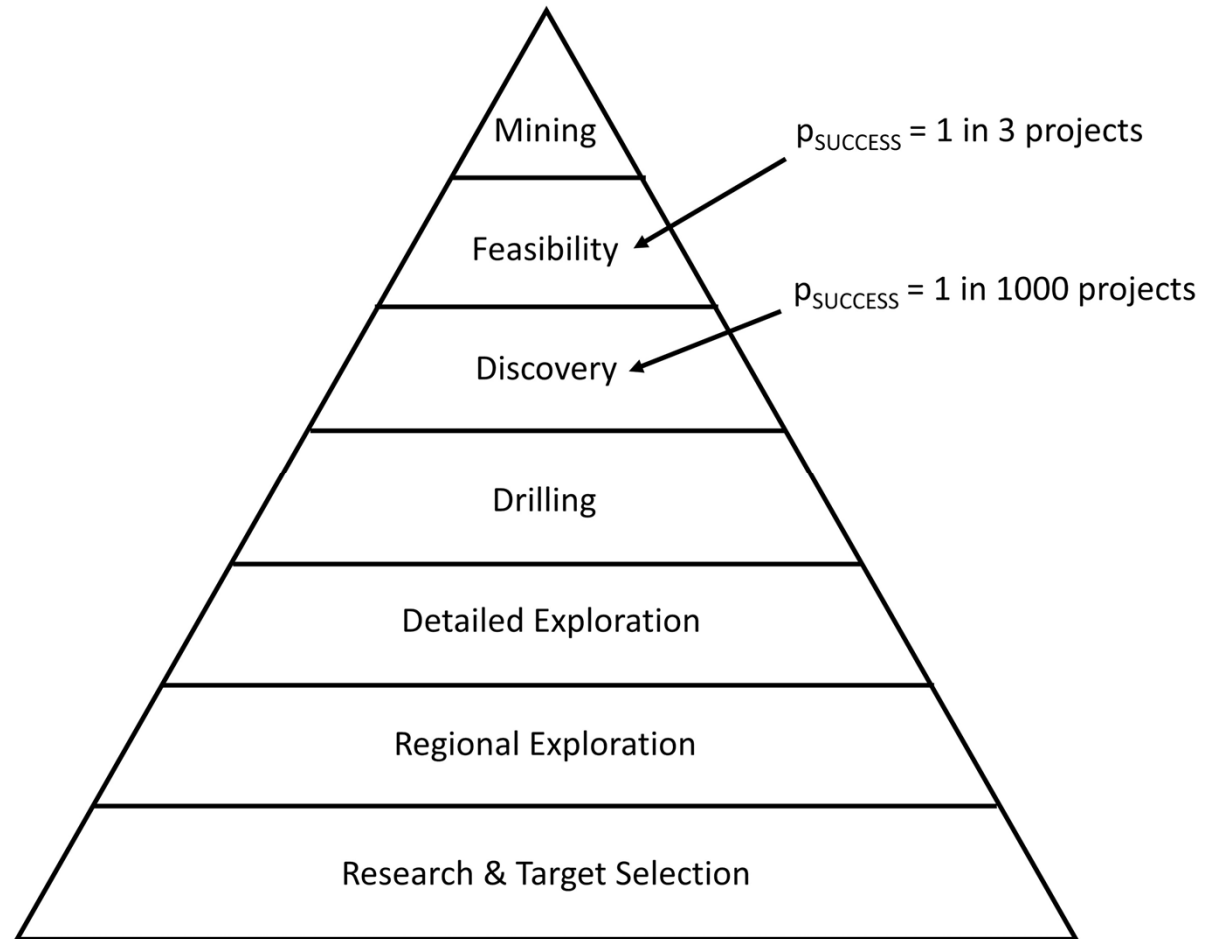


Preliminary information, subject to revision, not for citation or distribution

Proceso de descubrimiento de yacimientos minerales

- Puede tomar 15 años o más descubrir un yacimiento económico y muchos más años desarrollar un depósito en una mina
- El aumento de los factores ambientales, sociales y gubernamentales dificulta la apertura de nuevas minas y la expansión de las existentes
- Los nuevos descubrimientos provienen cada vez más de yacimientos más profundos
- ¿Se mantendrá la transición del "descubrimiento" a la mina en los niveles anteriores?

Marlatt, 2021



Critical minerals

- Por analogía, utilizamos datos de metales básicos y preciosos para informar si la industria minera satisface la demanda mundial de minerales críticos

¿Minerales críticos con suministro problemático?

← Grande → ← Gigante → ← Supergigante →

Elemento	Fortier EE.UU.	Fortier Global	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto
Bi	1.7×10^3	2.0×10^4	8.5×10^2	3.4×10^3	6.0×10^3	8.5×10^3	3.4×10^4	6.0×10^4	8.5×10^4	3.4×10^5	6.0×10^5
Mo	1.8×10^2	3.2×10^3	1.1×10^4	4.4×10^4	7.7×10^4	1.1×10^5	4.4×10^5	7.7×10^5	1.1×10^6	4.4×10^6	7.7×10^6
PGE	1.4×10^2	4.1×10^2	1.3×10^1	5.2×10^1	9.1×10^1	1.3×10^2	5.2×10^2	9.1×10^2	1.3×10^3	5.2×10^3	9.1×10^3
Sb	2.6×10^4	1.3×10^5	3.0×10^3	1.2×10^4	2.1×10^4	3.0×10^4	1.2×10^5	2.1×10^5	3.0×10^5	1.2×10^6	2.1×10^6
Sn	4.3×10^4	3.0×10^5	2.3×10^4	9.2×10^4	1.6×10^5	2.3×10^5	9.2×10^5	1.6×10^6	2.3×10^6	9.2×10^6	1.6×10^7
Te	N/A	5.2×10^2	5.0×10^1	2.0×10^2	3.5×10^2	5.0×10^2	2.0×10^3	3.5×10^3	5.0×10^3	2.0×10^4	3.5×10^4



Preliminary information, subject to revision, not for citation or distribution

¿Minerales críticos con menor riesgo de suministro?

← Grande → ← Gigante → ← Supergigante →

Element	Fortier EE.UU.	Fortier Global	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto
As	6.9×10^3	4.0×10^4	1.7×10^4	6.8×10^4	1.2×10^5	1.7×10^5	6.8×10^5	1.2×10^6	1.7×10^6	6.8×10^6	1.2×10^7
In	1.2×10^2	8.6×10^2	5.0×10^2	2.0×10^3	3.5×10^3	5.0×10^3	2.0×10^4	3.5×10^4	5.0×10^4	2.0×10^5	3.5×10^5
Mn	7.1×10^5	1.9×10^7	7.2×10^6	2.9×10^7	5.0×10^7	7.2×10^7	2.9×10^8	5.0×10^8	7.2×10^8	2.9×10^9	5.0×10^9
Ni	2.3×10^5	2.5×10^6	5.5×10^5	2.2×10^6	3.9×10^6	5.5×10^6	2.2×10^7	3.9×10^7	5.5×10^7	2.2×10^8	3.9×10^8
W	N/A	8.2×10^4	1.0×10^4	4.0×10^4	7.0×10^4	1.0×10^5	4.0×10^5	7.0×10^5	1.0×10^6	4.0×10^6	7.0×10^6
Zr	2.3×10^4	1.4×10^6	2.0×10^6	8.0×10^6	1.4×10^7	2.0×10^7	8.0×10^7	1.4×10^8	2.0×10^8	8.0×10^8	1.4×10^9



Preliminary information, subject to revision, not for citation or distribution

¿Minerales críticos con un riesgo mínimo de suministro?

- Algunos elementos básicos (Al, Be, Co, Ga, Ge, Li, Mg, Nb, REE, Sr, Ta, Ti y V) tienen valores de Fortier en EE. UU. y en todo el mundo que son inferiores a los valores umbral de Laznicka (2014) para grandes depósitos
- ¿Es la demanda de la humanidad lo suficientemente pequeña como para que la minería pueda satisfacer estas demandas sin riesgos significativos?
- Los REE no son geoquímicamente raros, pero los depósitos económicamente viables son raros
- Sin embargo, las concentraciones y cantidades de HREE en los depósitos de fosfato de los Estados Unidos exceden las de todos los recursos conocidos, por lo que los recursos no convencionales pueden ser la clave para el suministro de algunos productos básicos
- Algunos elementos son subproductos, por lo que su disponibilidad está controlada por factores tecnológicos y económicos que difieren marcadamente de los factores que controlan la producción de elementos



Conclusiones

← Grande → Gigante → Supergigante →

Elemento	Fortier EE.UU.	Fortier Global	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto
	1.8×10^2	3.2×10^3	2.5×10^1	1.0×10^2	1.8×10^2	2.5×10^2	1.0×10^3	1.8×10^3	2.5×10^3	1.0×10^4	1.8×10^4

- A medida que la humanidad consume proporcionalmente mayores cantidades de cada producto, se hace cada vez más difícil para la industria minera satisfacer la demanda
- Algunos elementos, como Ag, Au, Bi, Cu, Mo, Pb, PGE, Sb, Sn, Te y Zn, ya pueden ser problemáticos
- Otras materias primas, como Al, Be, Co, Ga, Ge, Li, Mg, Nb, REE, Sr, Ta, Ti y V pueden ser menos problemáticas, especialmente si podemos aprovechar los yacimientos no convencionales
- Los datos aquí presentados se basan completamente en los resultados de los últimos 5 años. No hacemos proyecciones para dar cabida a futuros incrementos como los que demanda la transición energética



Preliminary information, subject to revision, not for citation or distribution

04.2020

NATIONAL
GEOGRAPHIC

A Pessimist's
Guide to Life
on Earth in 2070

HOW WE LOST
THE PLANET

HOW WE SAVED
THE WORLD

An Optimist's Guide
to Life on Earth
in 2070

Los recursos de la Tierra proporcionan las materias primas que se necesitan para resolver los mayores problemas de la humanidad

04.2023

NATIONAL
GEOGRAPHIC

8
BILLION

THE POPULATION PARADOX

With some countries expanding and others declining,
are we nearing peak population?



Preliminary information, subject to revision, not for citation or distribution

Conclusiones



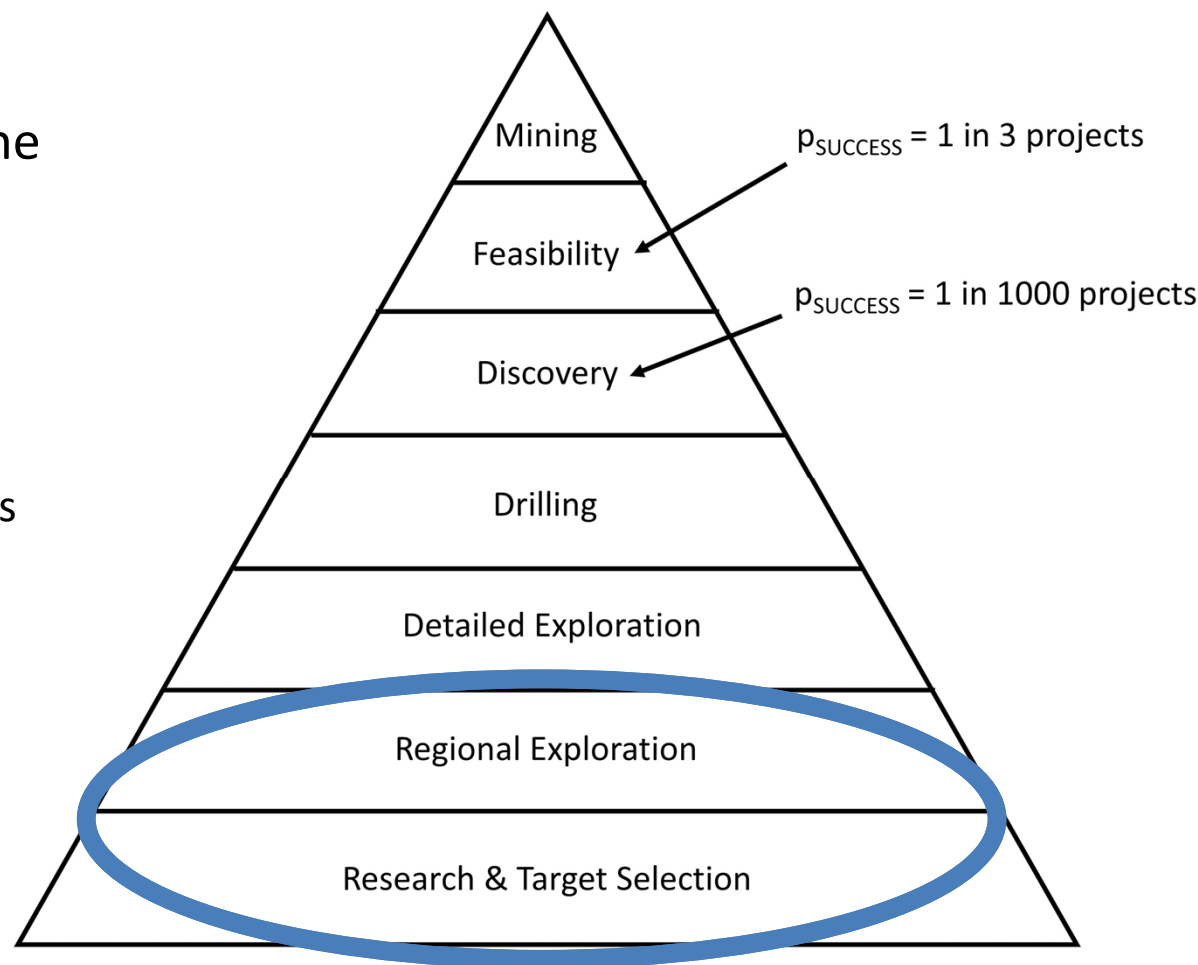
<https://www.vecteezy.com/vector-art/19017900-supply-and-demand-with-seesaw-showing-high-demand-and-low-supply-businessman-try-to-make-it-in-balance-or-equilibrium-for-global>

Nuestro reto

- La misión del USGS: ... *y contribuir a la resolución de problemas complejos.*
- El reto de todos los estudios geológicos es ayudar a garantizar el suministro de los recursos minerales que necesitan nuestros ciudadanos y la humanidad

Oportunidad

- Deliver research that helps increase the probability of discovery
- At the national and continental scale:
 - Geologic mapping, geophysical and geochemical data
 - Map locations of critical mineral deposits and mineral systems
 - Evaluate mine waste for reprocessing to provide critical minerals and other commodities
 - Advanced data analytics, such as AI to improve mineral prospectivity mapping





Preguntas?



Preliminary information, subject to revision, not for citation or distribution