



Universidad Nacional
Autónoma de México

Facultad de
Ciencias



Planetary Boundaries

And an Introduction to Thermodynamics of the Economic Process

Lecture

Development sustainability

July 25, 2022

Germán González-Dávila

PhD Population Biology and Evolution, Montpellier II, France

Centro Interdisciplinario de Biodiversidad y Ambiente, A. C.

<https://ceiba.org.mx/que-hacemos/blogs-opinion-editorial/german-gonzalez-davila/>

Plan de presentación

1. Introducción

- 1.1 Relación de la investigación científica con las políticas públicas
- 1.2 Antecedentes sobre los límites del crecimiento
- 1.3 La gran aceleración
- 1.4 Flujo de energía y materiales en el proceso económico global

2. Umbrales planetarios (la escuela de Estocolmo)

3. Termodinámica y proceso económico



Universidad Nacional
Autónoma de México

Facultad de
Ciencias



1. Introducción



Universidad Nacional
Autónoma de México

Facultad de
Ciencias



1.1. Relación de la investigación científica con la formulación de las políticas públicas

Investigación científica y políticas públicas

- La investigación científica avanza, lo cual permite entender mejor los procesos involucrados en nuestra relación con la naturaleza y la protección ambiental.
- Para que los conocimientos científicos puedan aplicarse en la formulación de políticas públicas es necesario “traducirlos” para su comprensión pública, en particular para quienes toman decisiones y formulan políticas públicas.
- El enfoque UP, de *Umbrales Planetarios*, es una explicación de los grandes impactos, a escala de la biosfera, que producen las actividades humanas.
- La crítica de la termodinámica al proceso económico demuestra que el crecimiento sostenido es físicamente imposible.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Facultad de
Ciencias

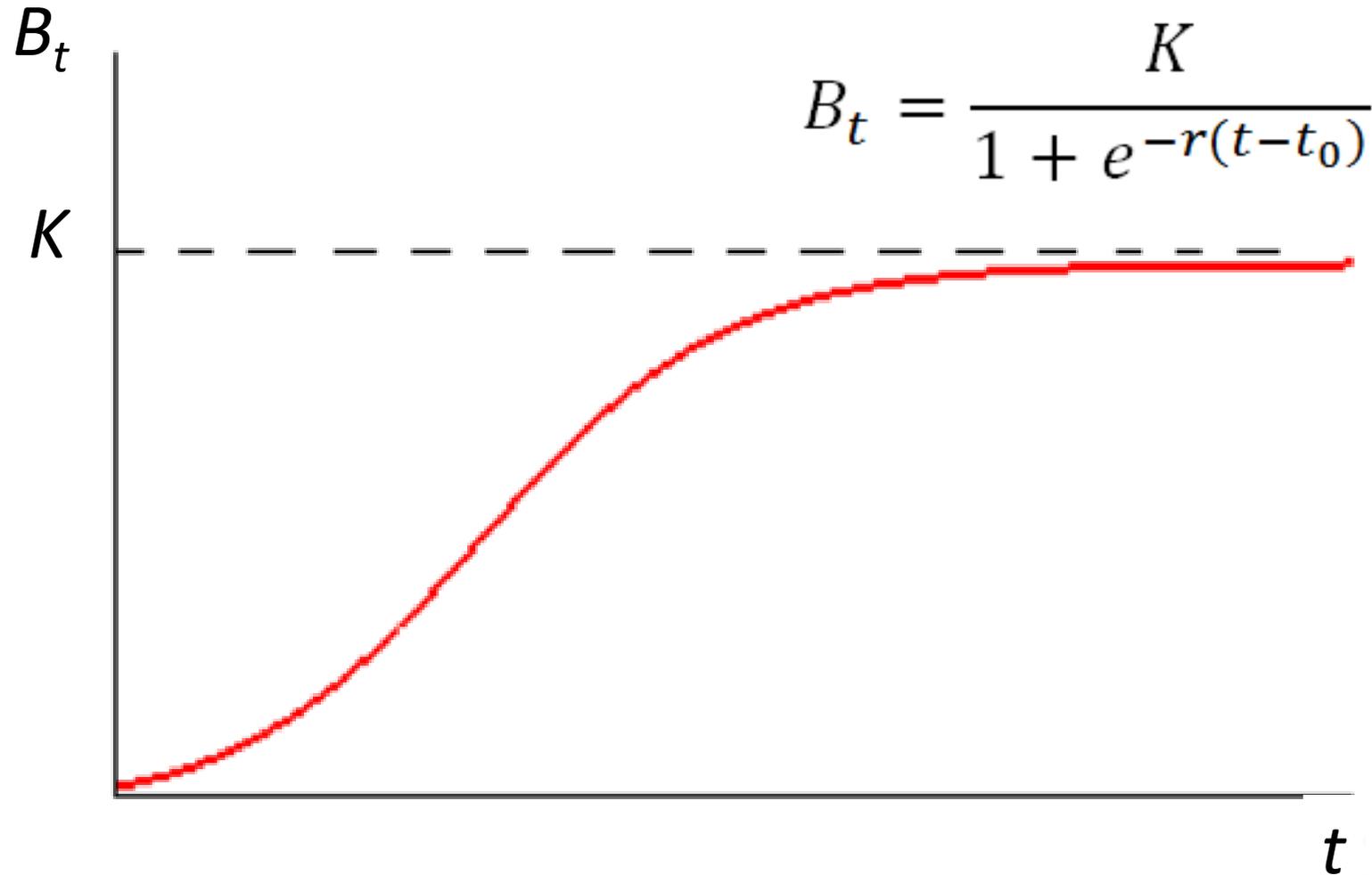


1.2. Antecedentes sobre los límites del crecimiento

Antecedentes sobre los límites del crecimiento

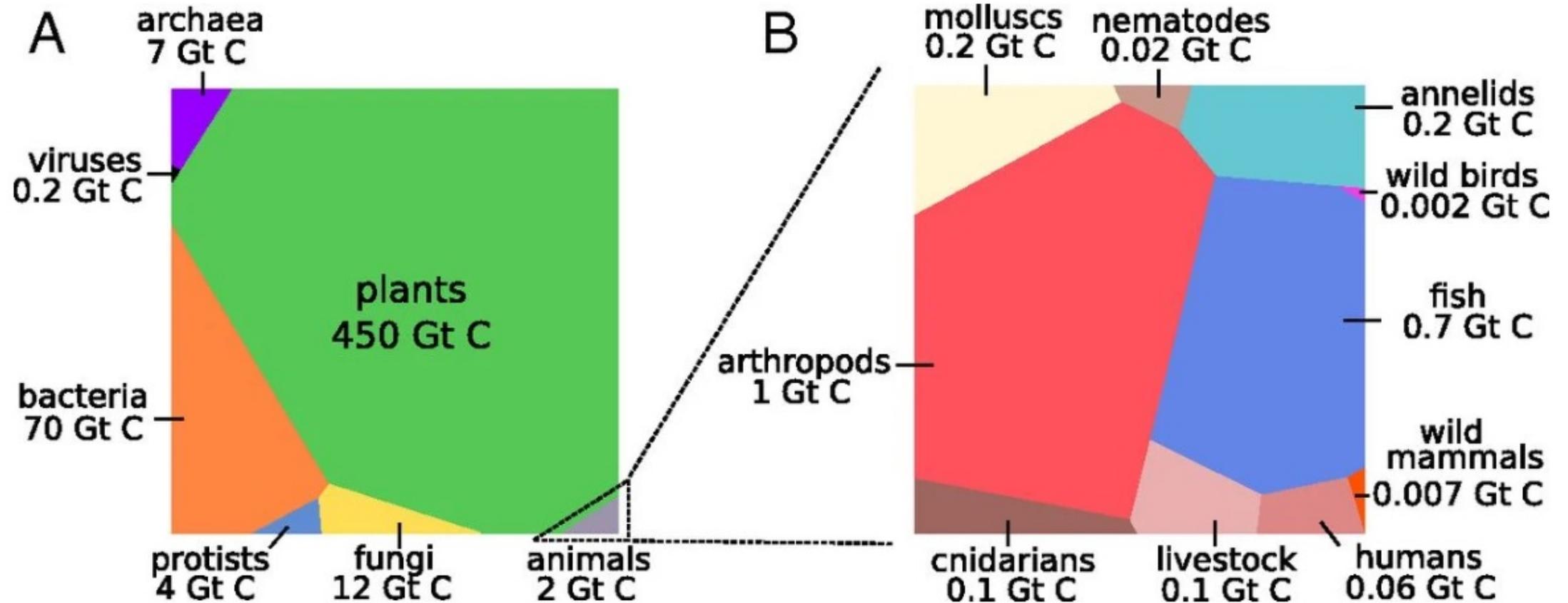
- **1972, el Club de Roma** publica *Los límites del crecimiento*, mostrando que el planeta es finito e impone límites físicos al crecimiento humano
(https://ceiba.org.mx/publicaciones/Centro_Documentacion/Biosphere/1972_Limits.to.Growth_meadows-et al.pdf)
- **1972, primera Cumbre de Medio Ambiente y Desarrollo Humano**, en Estocolmo, Suecia, inicia la atención pública mundial sobre la necesidad de proteger la integridad del medio ambiente.
(<https://ceiba.org.mx/declaracion-estocolmo-1972/>)
- **1987**, la CNUMAD publica «Nuestro futuro común», con el **concepto de desarrollo sustentable**.
- **1992**, «Cumbre de Río», más de 150 jefes de Estado aprueban la «**Agenda 21**» y crean las convenciones de cambio climático, biodiversidad y combate a la desertificación.
- **2009**, Rockström, J., *et al.* **A safe operating space for humanity**. *Nature*, Vol.461, Sept. 24th 2009
(https://ceiba.org.mx/publicaciones/Centro_Documentacion/Biosphere/090924_SafeSpace.Nature461_rockstrom.pdf)
- **2012, «Río +20»** reconoce que «somos más insustentables que en 1992» [y que en 1972]. Adopta la «Agenda 2030» y los «Objetivos de Desarrollo del Milenio» (ODS)
(https://ceiba.org.mx/publicaciones/120130_GSP_Report_web_final.pdf)
- **2022, «Estocolmo +50»**, Un planeta sano y prosperidad para todos – Nuestra responsabilidad, nuestra oportunidad (<https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/37743/SAP.pdf?sequence=3&isAllowed=y>)
(<https://www.stockholm50.global/es>) (<https://www.stockholmdeclaration.org/full-declaration/>)

Capacidad de carga

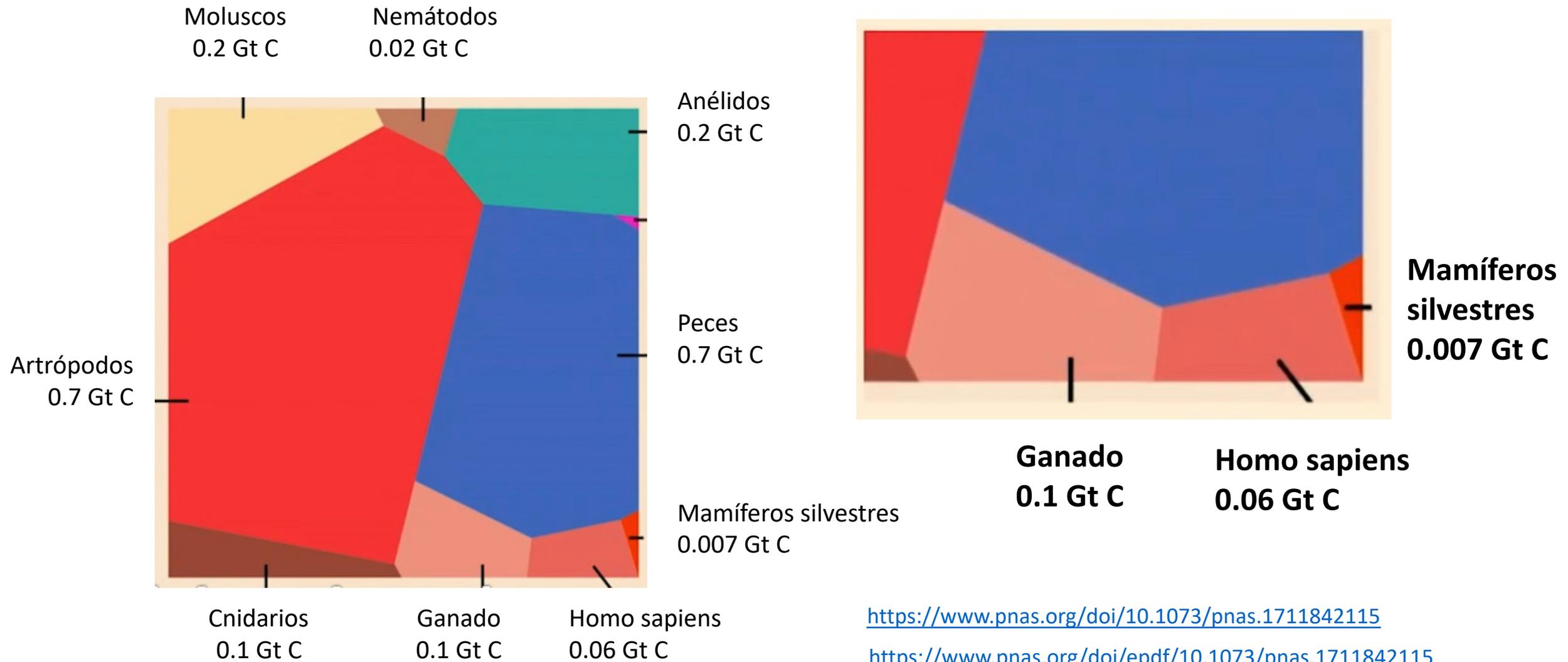


Distribución global de la biomasa planetaria

≈ 550 Gt C



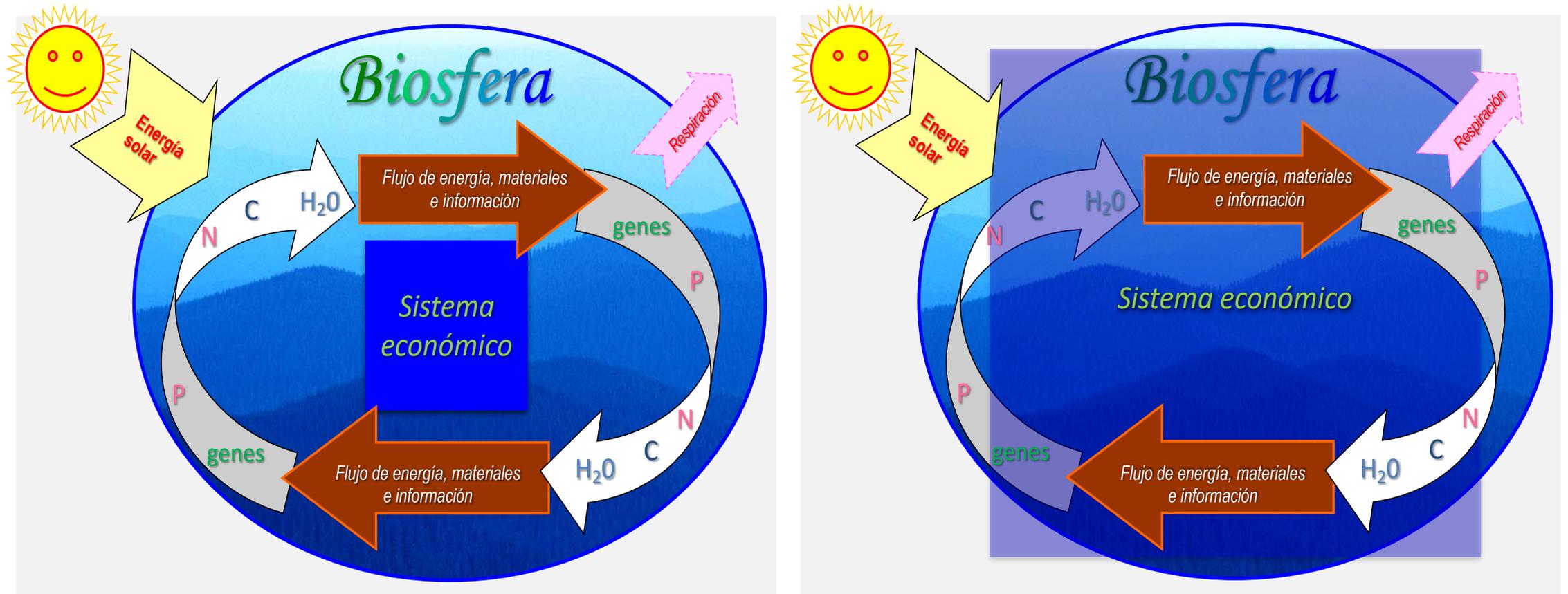
Distribución global de la biomasa animal



<https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1711842115>

<https://www.pnas.org/doi/epdf/10.1073/pnas.1711842115>

El sistema económico se encuentra acotado por las capacidades de carga del sistema biosfera





Universidad Nacional
Autónoma de México

Facultad de
Ciencias



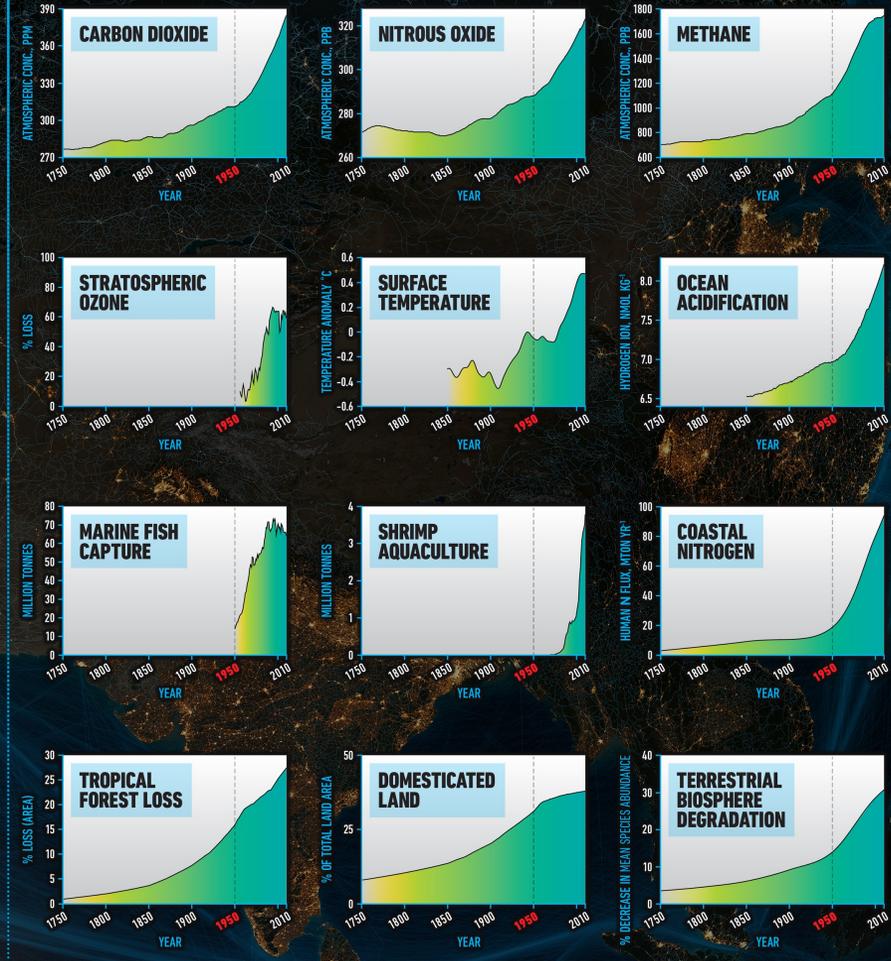
1.3. La gran aceleración

THE GREAT ACCELERATION

SOCIO-ECONOMIC TRENDS



EARTH SYSTEM TRENDS



REFERENCE: Steffen, W., W. Broadgate, L. Deutsch, O. Gaffney and C. Ludwig (2015), The Trajectory of the Anthropocene: the Great Acceleration, Submitted to *The Anthropocene Review*.
 MAP & DESIGN: Félix Pharand-Deschênes / Globaïa



Universidad Nacional
Autónoma de México

Facultad de
Ciencias



1.4. Flujo de materiales y energía en el proceso económico global

Flujo global de materiales



- Minerales para la construcción



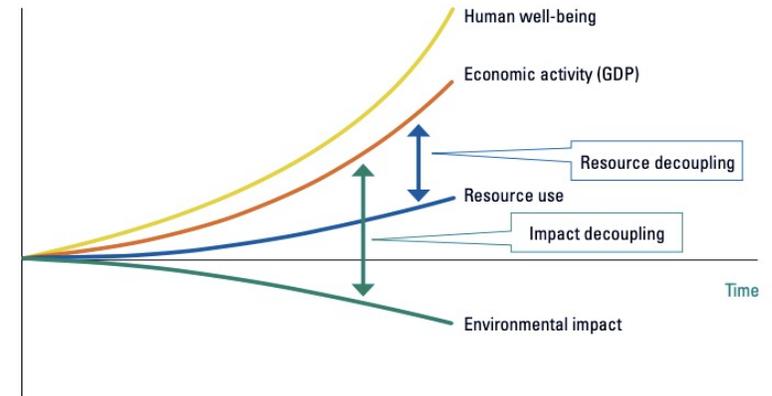
- Hierro y minerales industriales



- Combustibles fósiles



- Biomasa

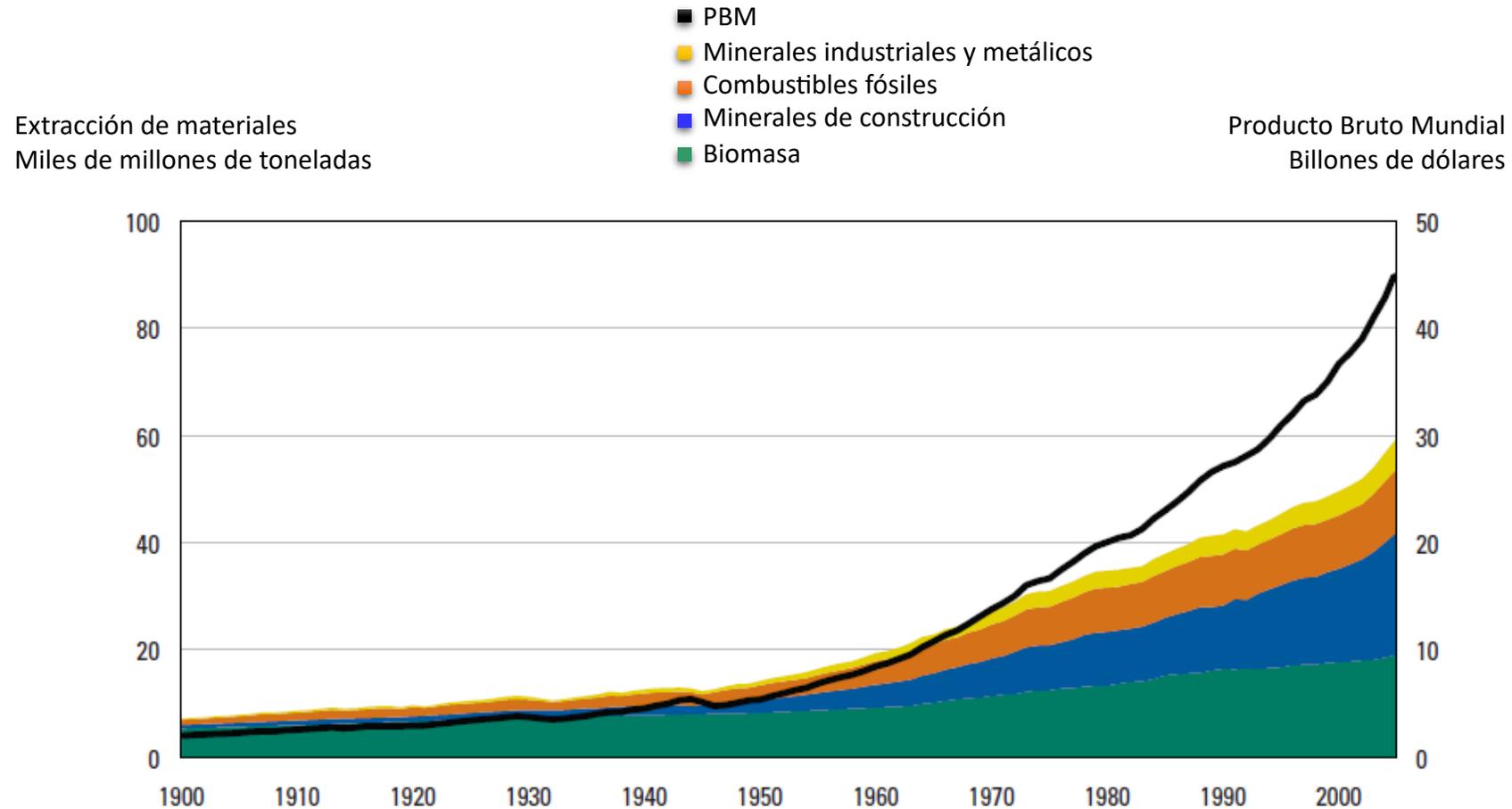


60 mil millones de toneladas en 2010;
Equivalentes a 8.57 t/hab

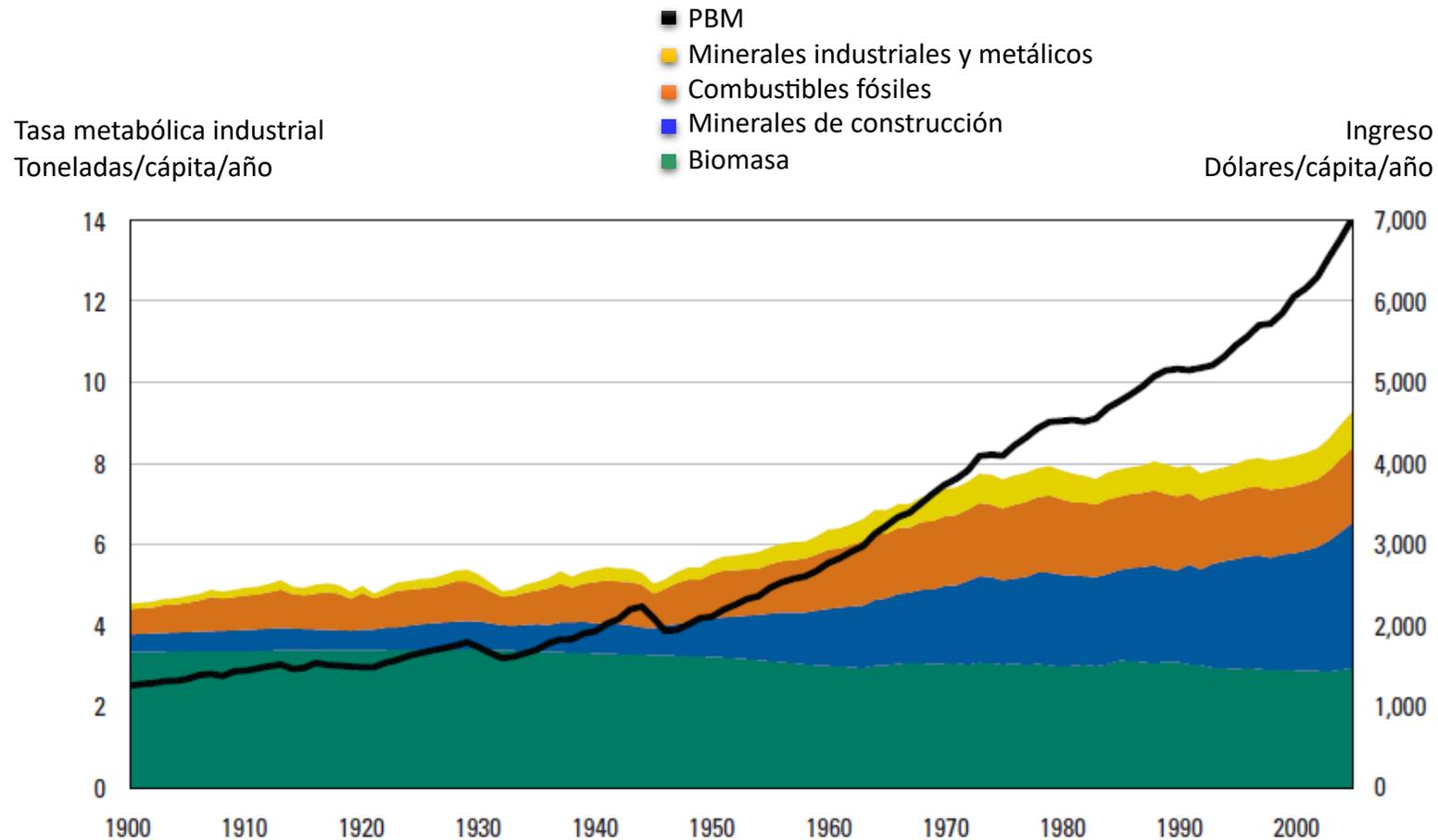
Se estiman
145 mil millones de toneladas en 2050;
Equivalentes a 15.59 t/hab
(a pesar del crecimiento poblacional)

Decoupling Natural Resource Use and Environmental Impacts from Economic Growth
United Nations Environment Programme
(2011)

Extracción de recursos 1900 – 2000

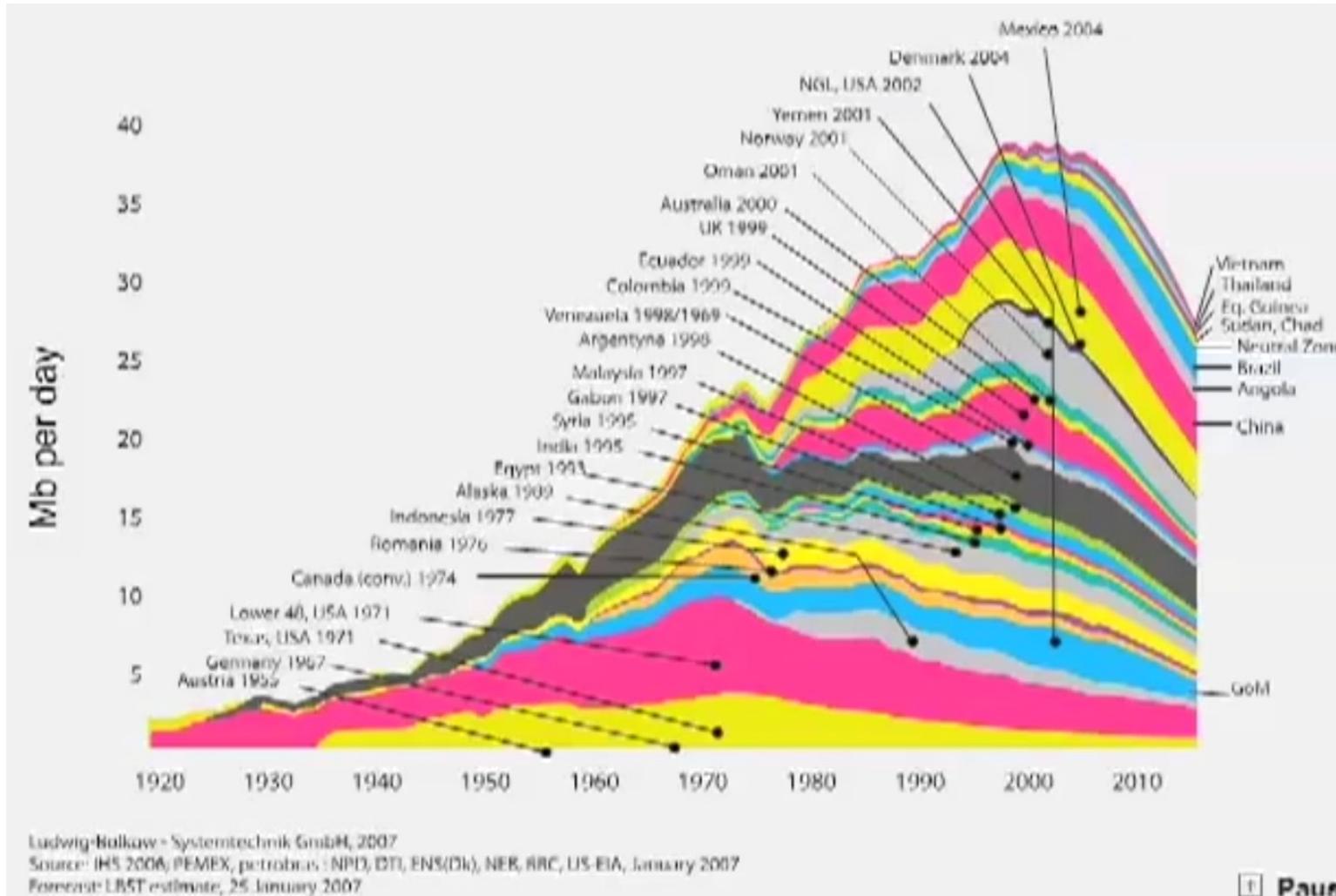


Metabolismo industrial 1900 – 2000



Source: Krausmann *et al.*, 2009; based on Sec Database "Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century", Version 1.0 (June 2009): <http://uni-klu.ac.at/socec/inhalt/3133.htm>

El pico del petróleo (la Curva de Hubbert)



2006

[Agencia
Internacional de la
Energía \(IEA\)
https://www.iea.org](https://www.iea.org)

2010

[ASPO \(Association for
the Study of Peak Oil
and Gas\)
https://www.peakoil.net](https://www.peakoil.net)

http://www.youtube.com/watch?feature=player_detailpage&v=mxIINmkE2eQ



Universidad Nacional
Autónoma de México

Facultad de
Ciencias



2. Umbrales planetarios

https://ceiba.org.mx/publicaciones/Eco_Eco/150213_Planetary.Boundaries.2.0_Steffen-et-al.pdf

https://ceiba.org.mx/publicaciones/GermanGD/170901_Transgresiones.Planeta_GGD_Config44.pdf

El Centro de Resiliencia de Estocolmo

<https://www.stockholmresilience.org>

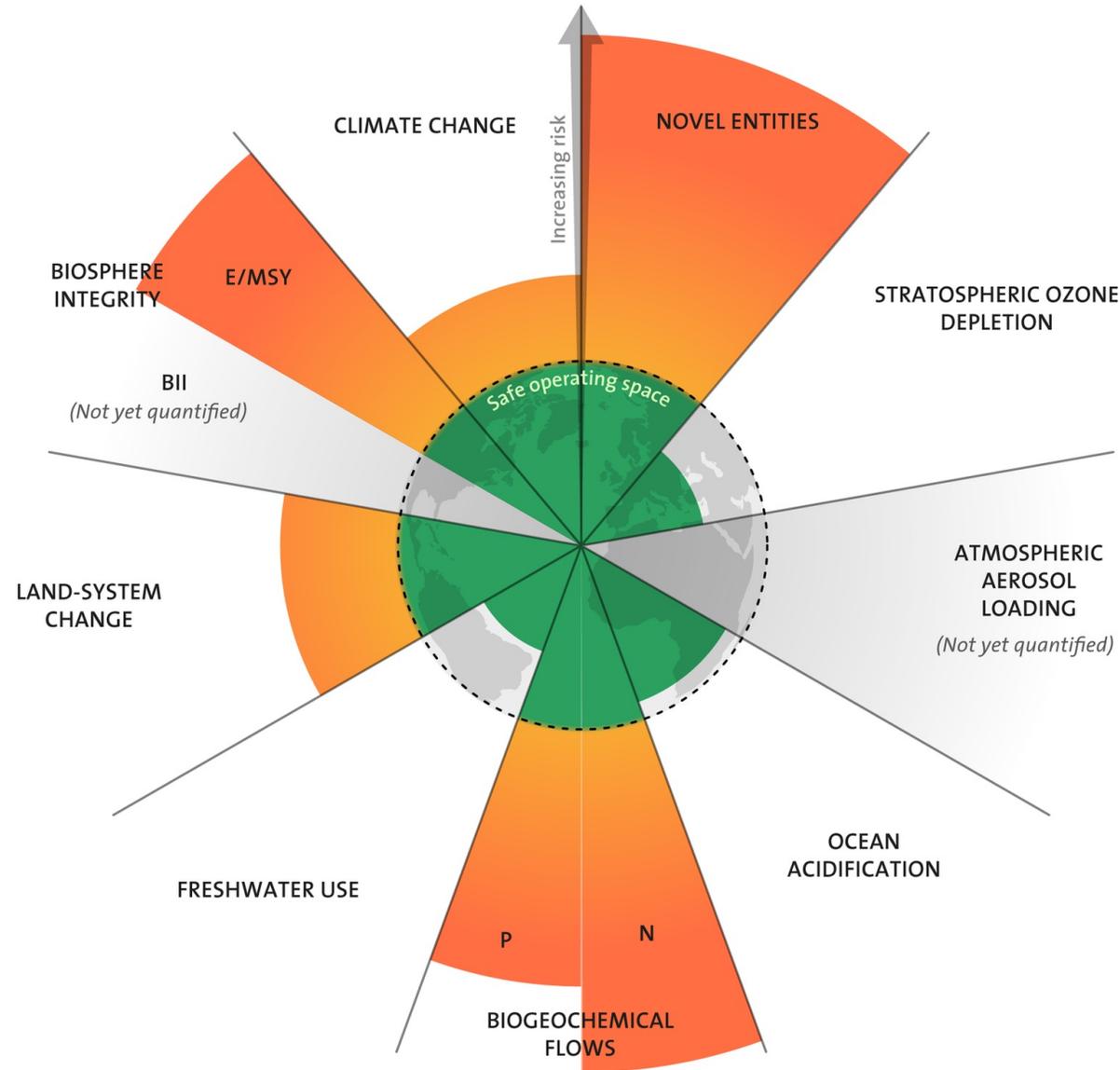
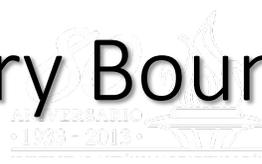
- Desde su creación el 1 de enero de 2007, el Centro de Resiliencia de Estocolmo (SRC), se ha constituido como uno de los más destacados *think tanks* en sustentabilidad ambiental del mundo.
- Centra sus esfuerzos en desarrollar conocimientos aplicables para tomadores de decisiones y hacedores de políticas que conduzcan a generar capacidades de resiliencia a escala de la biosfera.

Otro método para estimar la biocapacidad de la biosfera:

<https://www.footprintnetwork.org>



Planetary Boundaries



[Rockström, J., et al. 2009. A safe operating space for humanity. *Nature*, Vol.461, Sept. 24th 2009.](#)

[Steffen, W, et al. 2015. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* 13 Feb 2015: Vol. 347, Issue 6223, pp. DOI: 10.1126/science.1259855](#)

[Persson, Linn, et al. 2022. Outside the Safe Operating Space of the Planetary Boundary for Novel Entities. *Environ. Sci. Technol.* 2022, 56, 1510-1521. doi.org/10.1021/acs.est.1c04158](#)

Integridad de la biosfera

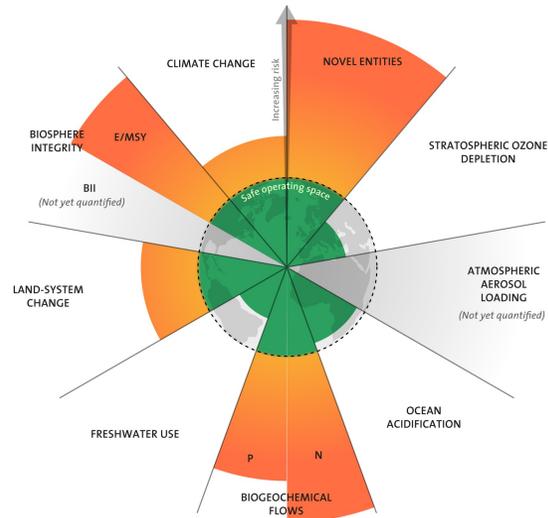
- Las modificaciones en la integridad de la biosfera consideran dos fases:

- **Diversidad genética**, la integridad estructural de la biosfera, su “banco de información”, que determina el potencial de los seres vivos para continuar su evolución en sinergia con el componente abiótico del Sistema Tierra (ST).

Variable de control: tasa de extinción.

- **Diversidad funcional**, la resiliencia ecológica de la biosfera y su integridad evolutiva.

Variable de control: índice de biodiversidad intacta (indicador indirecto).



Véase también: <https://ceiba.org.mx/biodiversidad-y-servicios-ecosistemicos/>

[https://ceiba.org.mx/publicaciones/Centro Documentacion/Biosphere/2020 LivingPlanetReport.pdf](https://ceiba.org.mx/publicaciones/Centro_Documentacion/Biosphere/2020_LivingPlanetReport.pdf)

<http://www.biodiversidad.gob.mx/pais/capitalNatMex.html>

Ciclos biogeoquímicos del nitrógeno y fósforo

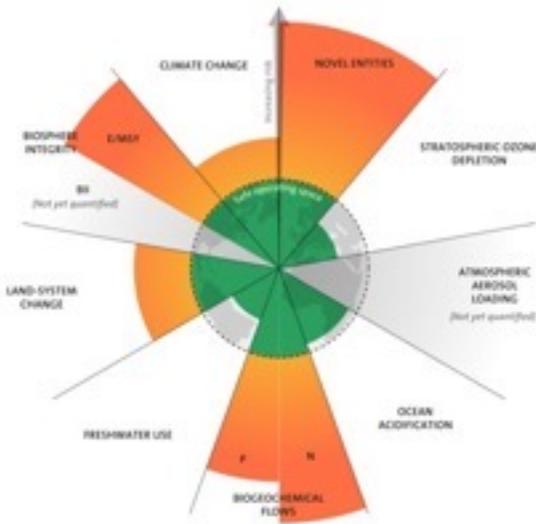
- El análisis UP se centra en los ciclos del nitrógeno y del fósforo, ambos indispensables para los seres vivos, ya que el nitrógeno forma parte de las proteínas y del adn, y el fósforo interviene en el almacenaje y uso de energía.
 - **Variable de control:** Millones de toneladas por año

El uso global del **nitrógeno**, industrial y por fijación biológica forzada en agricultura, es 2.5 veces el UP

[El reservorio del nitrógeno es la atmósfera y su flujo ocurre desde la parte abiótica a la biótica de la biosfera gracias a bacterias y algas cianofíceas nitrificantes, que capturan el nitrógeno atmosférico y lo fijan al suelo o al agua en forma de nitratos, a partir de lo cual es utilizable por plantas verdes y fitoplancton. Para lograr la producción alimentaria actual, *Homo sapiens* bombea hacia sus cultivos 1.5 veces más que la biosfera por sí sola.]

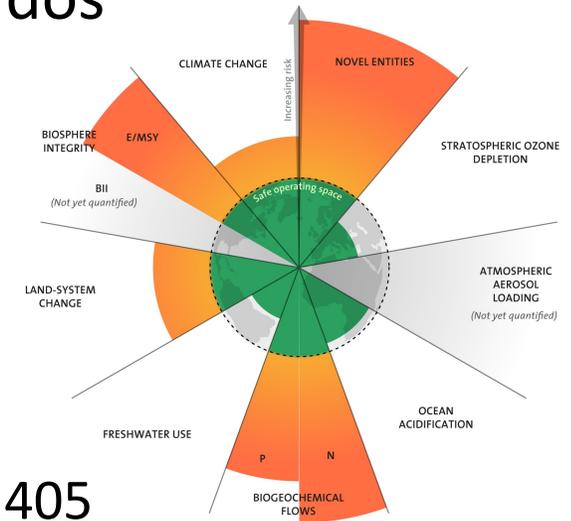
El uso del **fósforo** para la agricultura poco más que duplica los límites del UP

[El gran depósito del fósforo no es la atmósfera, sino minerales fosfatados cuya erosión libera fosfatos que quedan disueltos en cuerpos de agua, a partir de los cuales quedan disponibles para las plantas y demás seres vivos. *Homo sapiens* transfiere a sus cultivos otro tanto que la naturaleza.]



Ciclo del carbono - cambio climático

- El uso intensivo de combustibles fósiles y la pérdida de cobertura vegetal original por cambios de uso de suelo, constituyen las dos fuentes más importantes del exceso de CO₂ en la atmósfera terrestre, lo cual intensifica su efecto invernadero.
 - **Variable de control:** miles de millones de toneladas de GEI y concentraciones de carbono en la atmósfera terrestre en partes por millón.
- De la época preindustrial a la fecha, el uso de la atmósfera como sumidero de gases de efecto invernadero (GEI) ha incrementado las concentraciones en 43%, pasando de 280 partes por millón (ppm) a 405 ppm en 2020.
- El UP de bajo riesgo es de 350 ppm –equivalente a un incremento de 1.5°C en la temperatura superficial global–, de modo que ya nos encontramos en zona de riesgo, creciente, y corriendo hacia zona de alto riesgo –equivalente a +3°C o superior.

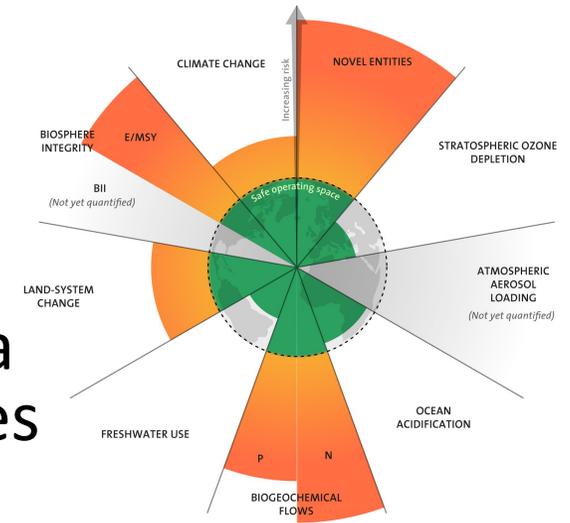


Véase también: <https://ceiba.org.mx/cambio-climatico-uso-de-energia/>

https://ceiba.org.mx/publicaciones/Centro_Documentacion/Cambio_Climatico/190807_SpecialRepLandUse_SPM.pdf

Acidificación de los océanos

- Estrechamente vinculado con el incremento de las concentraciones de CO₂ en la atmósfera, en estrecha correlación con las concentraciones de hidrogeniones (H⁺) en la superficie del océano.

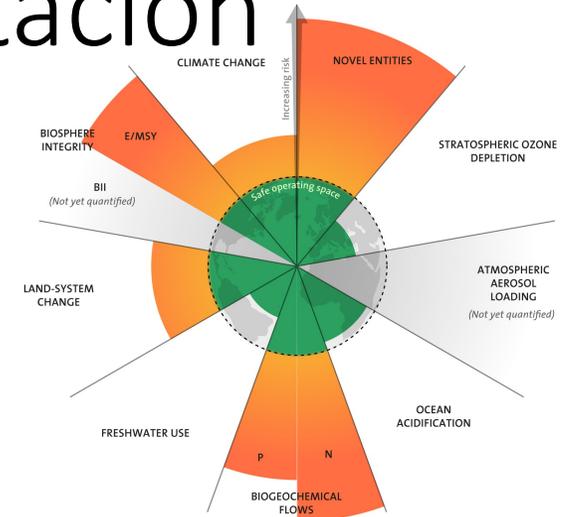


- Durante los últimos 200 años, las concentraciones de H⁺ se incrementaron 30%, lo cual influye en la química de los carbonatos de calcio (CaCO₃) en los océanos, intensificando su disolución y disminuyendo su saturación en muchos organismos marinos, como moluscos y corales (lo que reduce la capacidad de captura de carbono por estos organismos marinos).
- **Variable de control:** Ω_{arag} (omega aragonita)

Véase para complementos: <https://ceiba.org.mx/category/agenda-ambiental/portafolio-mares-y-costas/>

Cambio de uso de suelo y deforestación

- El cambio de uso de suelo hace desaparecer ecosistemas originales para destinar esas tierras a agricultura, ganadería, asentamientos humanos, parques industriales, parques mineros, grandes infraestructuras y tierras abandonadas.
 - **Variable de control:** superficie ocupada por bosques primarios tropicales, templados y boreales (biomas que tienen una función mayor en los procesos biogeofísicos que intervienen en la regulación del clima, el intercambio de energía, la disponibilidad de agua y la interfaz con la atmósfera).
- Globalmente, la superficie forestal actual es de 62% respecto de la original, dentro del rango de 54 a 75% del UP de riesgo medio.



Véase la Declaración del Consejo del *Millennium Ecosystem Assessment*:

[https://ceiba.org.mx/publicaciones/Centro Documentacion/MEA/050300 Gastando+ MEA.pdf](https://ceiba.org.mx/publicaciones/Centro_Documentacion/MEA/050300_Gastando+ MEA.pdf)

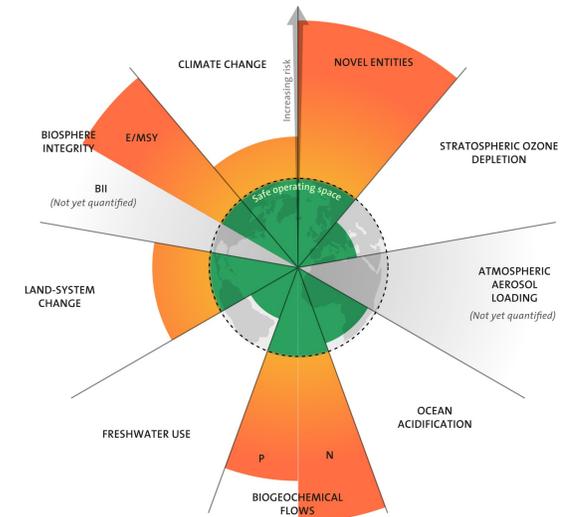
Complementos: <https://ceiba.org.mx/manejo-integrado-paisaje/>

Disponibilidad y calidad del agua

- La situación del uso del agua (ríos, lagos, reservorios y aguas subterráneas) es muy variable de un lugar a otro. En algunas regiones del mundo se vive una situación de estrés hídrico por falta de disponibilidad o por contaminación.

- **Variable de control:** flujo ecológico de agua en km^3

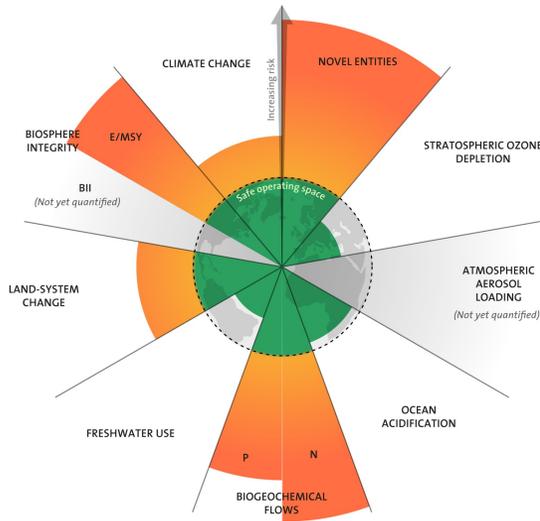
- El uso global actual ronda los 2600 kilómetros cúbicos por año (km^3/y), respecto de los 4 000 km^3/y disponibles para mantener una seguridad media de este UP.
 - Situación de bajo riesgo global, pero con algunas zonas ya en alto riesgo, que coinciden con las de mayor concentración de la población humana en el mundo.



Debilitamiento de la capa de ozono

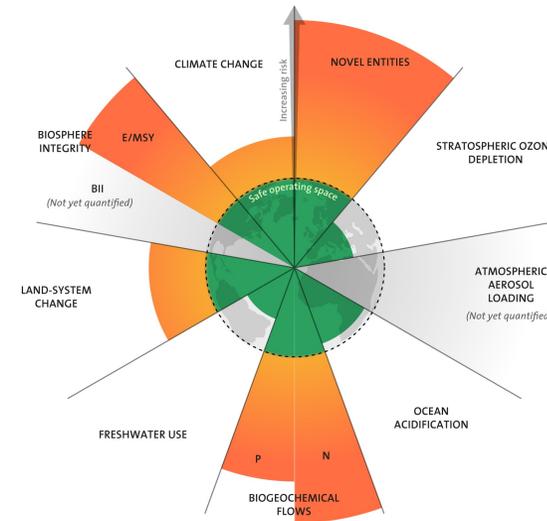
La ozonósfera forma una parte de la estratosfera que se extiende aproximadamente entre los 15 y los 40 km de altitud y reúne 90% del ozono presente en la atmósfera. Constituye un escudo que protege a los seres vivos contra la radiación ultravioleta de alta frecuencia, pues absorbe de 97 a 99% de ella.

- La capa de ozono puede debilitarse por la acción de radicales catalíticos, como el óxido nítrico (NO), óxido nitroso (N₂O), hidroxilos (OH), cloro (Cl) y bromo (Br), que existen de manera natural pero sus concentraciones en la atmósfera se incrementaron por su uso industrial, particularmente de cloro y bromo, con la producción y uso de compuestos halogenados, los clorofluorocarbonos (CFC) y los bromofluorocarbonos (BFC).
- El Protocolo de Montreal permitió erradicar y controlar el uso de estas sustancias, con lo que la capa de O₃ se ha recuperado y el agujero persiste solamente en los cielos de la Antártida.
- **Variable de control:** concentración de O₃ en la columna atmosférica (unidades Dobson, DU).
- Concentración para mantenerse en zona de seguridad: 275 DU
- Concentración en la primavera antártida: 200 DU



Químicos, materiales y nuevas entidades

- Hoy día, más de 100 000 sustancias diversas se encuentran en el comercio global. Si consideramos también los nanomateriales, los polímeros que se degradan en microplásticos y las entidades orgánicas modificadas, la lista es mucho más extensa.
- **Variables de control propuestas (2022):**
Tendencias en la producción de NE;
Tendencia de las emisiones de NE;
Impactos indeseables de NE en el Sistema Tierra (ST).
- Sin variable de control definitiva, es indispensable aplicar el principio precautorio e iniciar acciones preventivas.

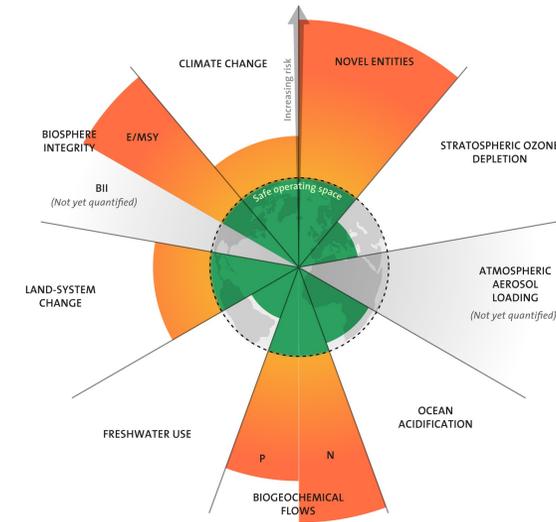


<https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.est.1c04158>

Véase también: <https://ceiba.org.mx/materiales-quimicos-y-residuos/>

Carga de aerosoles

- Afectan el funcionamiento del ST de diversas maneras, reduciendo la incidencia de radiación solar sobre la superficie terrestre o como precursores de gases de efecto invernadero.
 - Los aerosoles son coloides de partículas finas, sólidas o líquidas, suspendidas en el aire. Pueden ser naturales, como la niebla, la exudación forestal, el vapor de géiseres, partículas volcánicas, o pueden ser antropogénicos, como el smog, los polvos y las micropartículas suspendidas contaminantes o el carbón negro.
- **Variable de control:** profundidad óptica de aerosoles (AOD), con valor de referencia 0.15 y umbral ubicado en un valor de 0.25, con zona de riesgo entre 0.25 y 0.5, más allá del cual el UP es transgredido
- Situación actual: valor 0.3, ocasionalmente llega a 0.4



Procesos y transgresiones

	PROCESO BIOFÍSICO		GRADO DE TRANSGRESIÓN	UP	SITUACIÓN ACTUAL
1	Integridad de la biosfera	1.1 Genética	+++++	10 E/MSY	100 a 1000 E/MSY
		1.2 Funcional	(+++)	90% BII	?
2	Ciclos biogeoquímicos	2.1 Nitrógeno (N)	N: +++++	NG: 62 Mton/y	NG: 150 Mton/y
		2.2 Fósforo (P)	P: +++++	PG: 11 Mton/y PR: 6.2 Mton/y	PG: 22 Mton/y PR: 14 Mton/y
3	Ciclo del carbono (cambio climático)		+++	350 ppm CO ₂	400 ppm CO ₂
4	Acidificación de los océanos		++	≥ 70% (Ω_{arag})	84% (Ω_{arag})
5	Cambio de uso de suelo y deforestación		+++	54 a 75%	62%
6	Disponibilidad y calidad del agua		+	4,000 km ³ /y	2,600 km ³ /y
7	Debilitamiento de la capa de ozono		+	290 DU	200 DU (Ant.)
8	Nuevas entidades materiales		(+++)	TP; TR; UI	?
9	Carga atmosférica de aerosoles		(+++)	AOD 0.25	(AOD 0.30)

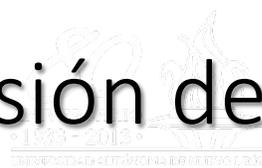
Las nueve transgresiones planetarias: 1) pérdida de diversidad genética y pérdida de capacidades funcionales de los ecosistemas; 2) exceso de nitrógeno y fósforo que degrada estructuras tróficas; 3) exceso de carbono en la atmósfera que induce calentamiento por intensificación del efecto invernadero; 4) acidificación de los océanos por incremento en la acidez en superficie; 5) deforestación y desertización por cambio de uso de suelo; 6) alteración física y contaminación de los grandes cuerpos de agua del mundo; 7) reducción de la capa de ozono; 8) exceso de materiales no naturales, químicos, plásticos, residuos; 9) exceso de aerosoles en la atmósfera que la contaminan y afectan el clima.

Los + indican, de uno a cinco, el nivel de perturbación de cada proceso crítico de la biosfera; los paréntesis indican que la información disponible, a escala global, es insuficiente.

E/MSY = Extinciones por cada millón de especies por año; BII = Índice de Biodiversidad Intacta; NG = Nitrógeno global;

PG = Fósforo global; PR = Fósforo regional; Mton/y = Millones de toneladas por año; ppm = Concentraciones de CO₂ en la atmósfera en partes por millón; Ω_{arag} = Potencial de disolución de CaCO₃ en los océanos (los porcentajes son respecto del 100% pre-industrial; km³/y = Kilómetros cúbicos por año; DU = Unidades Dobson; AOD = Profundidad óptica de aerosoles.

FUENTE: Sterren *et al.*, 2015. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet, *Science*, V347.



Transgresión de umbrales planetarios



PROCESO BIOFÍSICO		GRADO	DOCUMENTADO
Cambio en integridad de la biosfera	Genética	Red	✓
	Funcional		✗
Ciclos del nitrógeno y el fósforo		Red	✓
Ciclo del carbono		Red	✓
Acidificación de los océanos		Orange	✓
Cambio de uso de suelo		Orange	✓
Estrés hídrico		Orange	✓
Reducción de la capa de ozono		Yellow	✓
Nuevos materiales y químicos		Orange	⌘
Carga atmosférica de aerosoles		Orange	✗



Universidad Nacional
Autónoma de México

Facultad de
Ciencias



3. Termodinámica, una verdad incómoda

Georgescu-Roegen, N. (2010). *The entropy law and the economic problem*. Chap.1 in: *From bioeconomics to degrowth*. New Economics Series, Routledge, London, Mauro Bonaiuti (ed.). <https://www.taylorfrancis.com/books/bioeconomics-degrowth-nicolas-georgescu-roegen-mauro-bonaiuti/e/10.4324/9780203830413?refId=1e2a3b0c-7882-4742-9564-306618733422>

Rifkin, J. (1989). *Entropy into the Greenhouse World*. Bantam Books, New York, USA. 354 pp.

Smil, V. 2022. *How the World Really Works*. Penguin Books, UK, 326 pp.

Smil, V. 2018. *Energy and Civilization, A History*. MIT, Cambridge, MA, 552 pp.

Smil, V. 2013. *Harvesting the Biosphere*. MIT, Cambridge, MA, 307 pp.

<http://www.isecoeco.org>

<https://en.wikipedia.org/wiki/Degrowth>

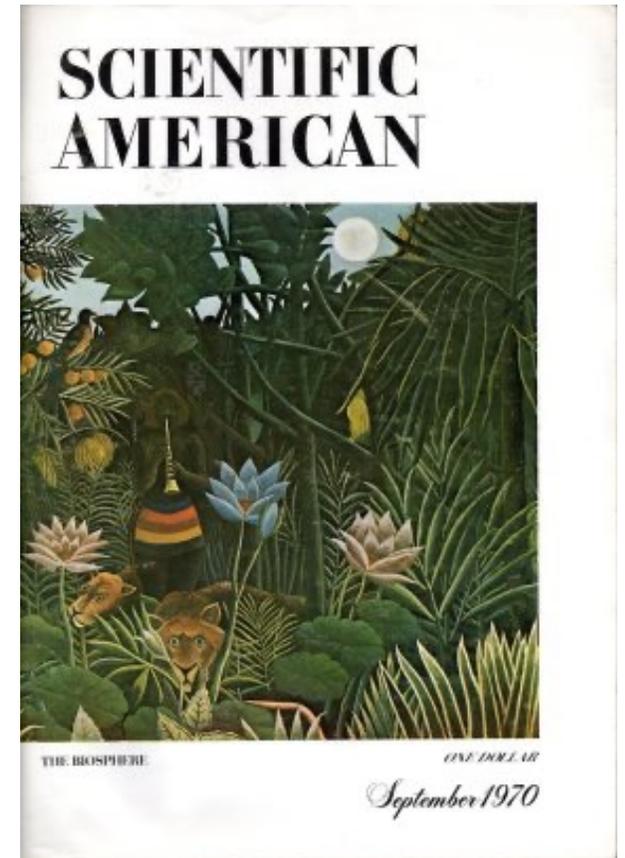
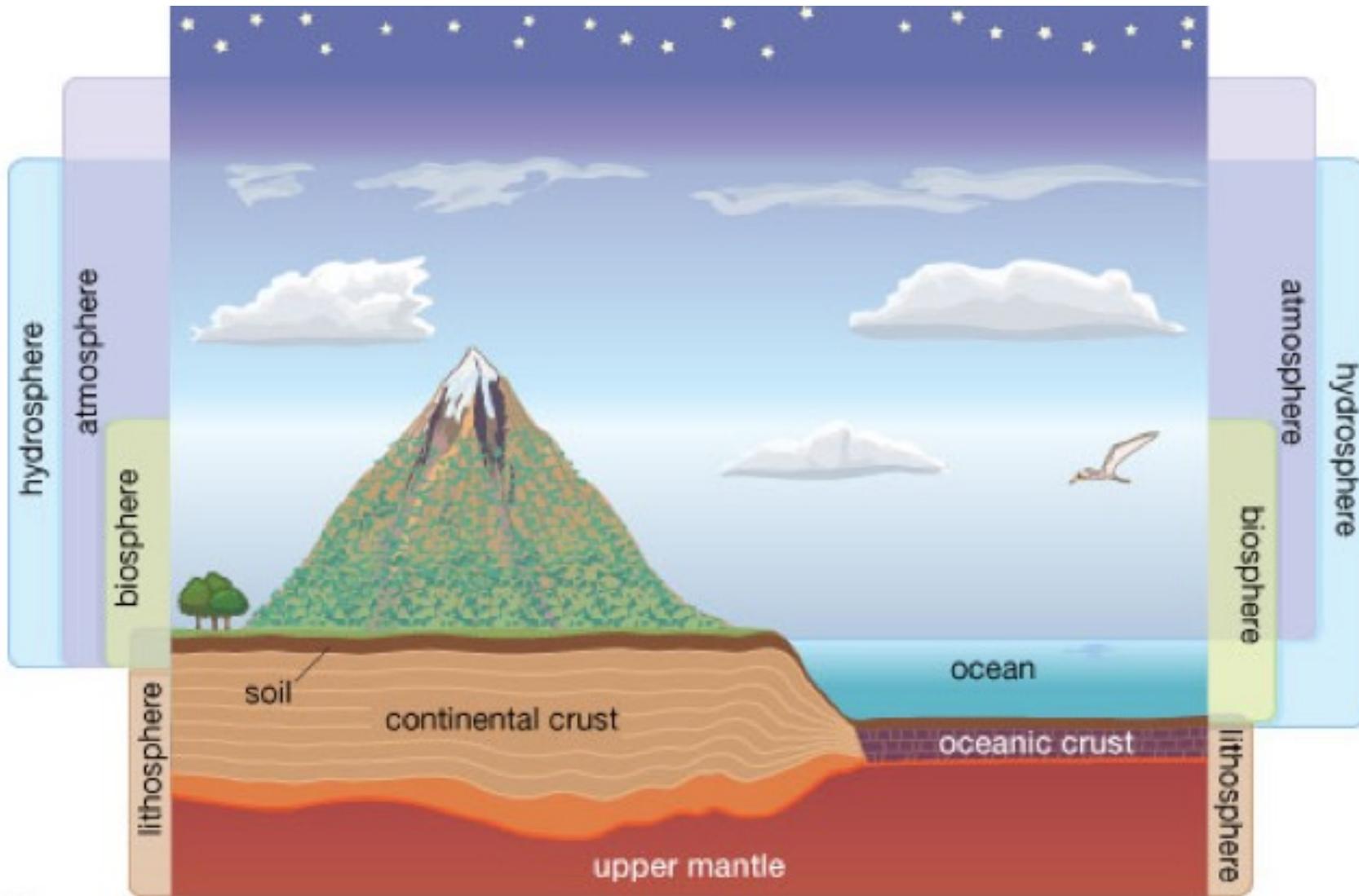
Odum P. E. (1972). *Ecología*. Nueva Editorial Interamericana, 3ª Edición, México.

Termodinámica y sus leyes

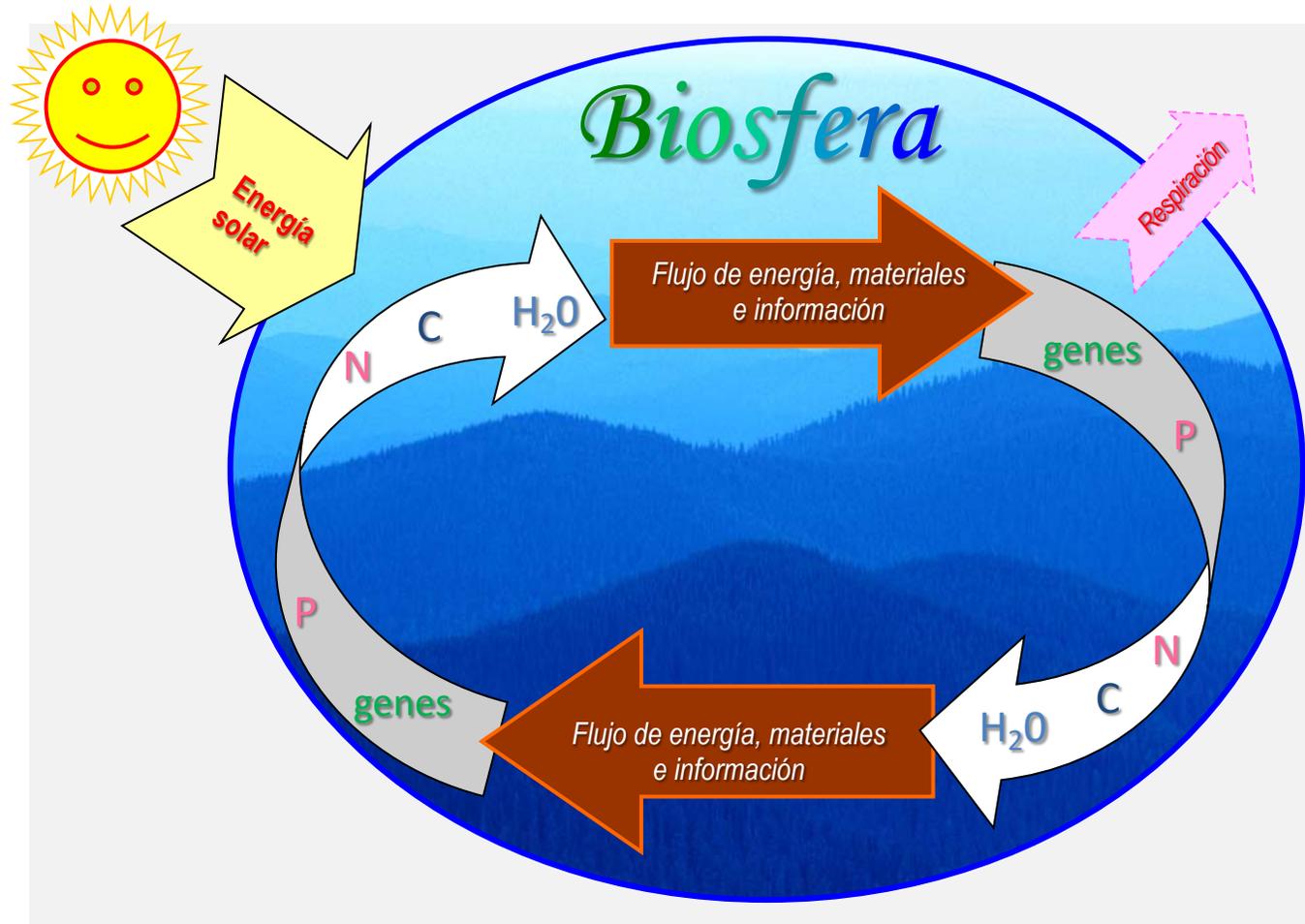
- **Termodinámica:** disciplina de la física que estudia la interconversión del calor, o energía térmica, en otras formas de energía
- 1ª La energía (la materia) no se crea ni se destruye, sólo se transforma de una a otra forma de energía (o materia)
- 2ª Cada vez que se transforma energía (o materia) de una forma a otra, parte de la energía (o la materia) se disipa como energía calórica (o materia difusa)
- 3ª La cantidad de energía (y materia) en el universo es constante, pero la entropía S total se incrementa:

Por consiguiente, el universo tiende al caos

Biosfera



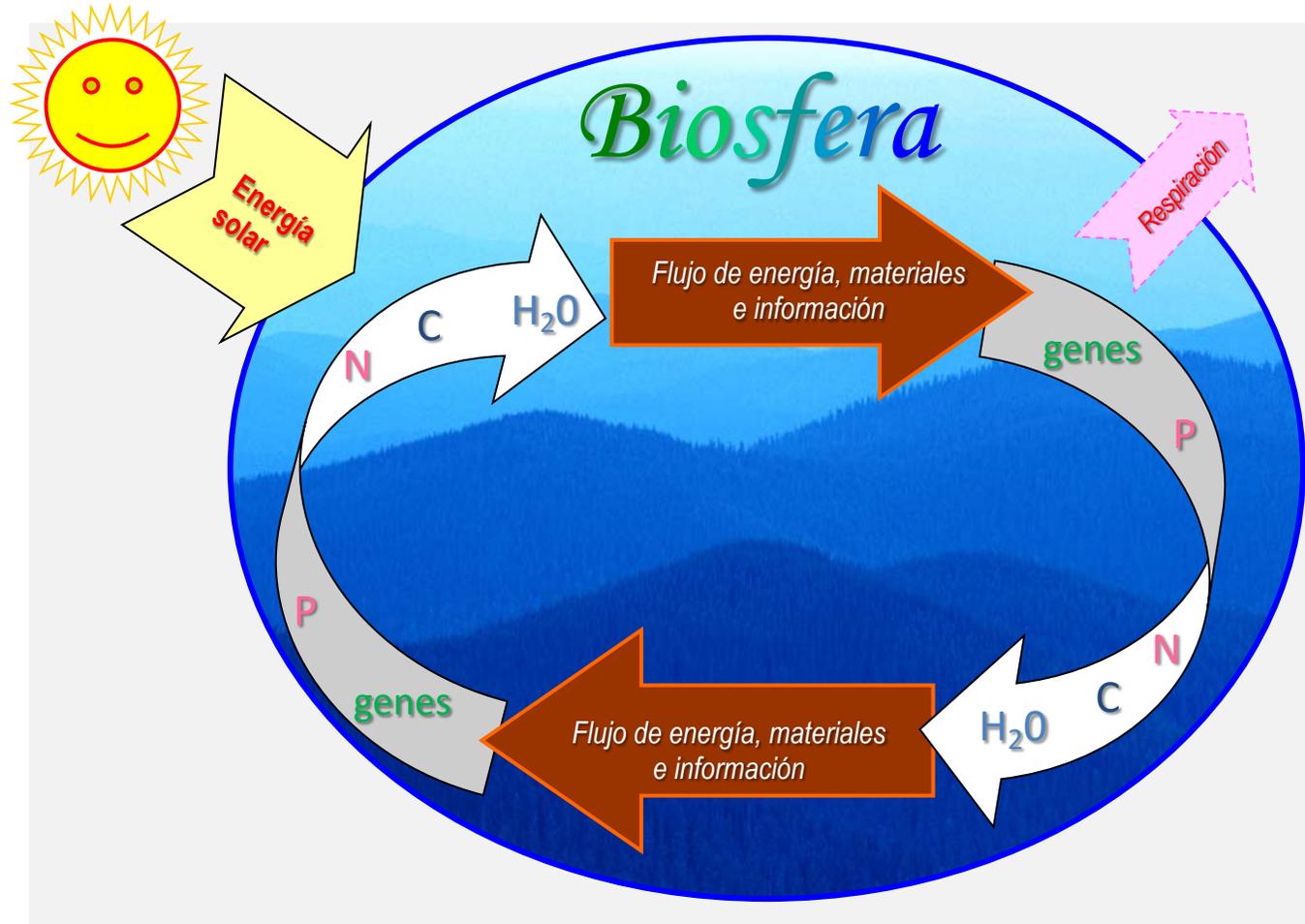
Un sistema termodinámico



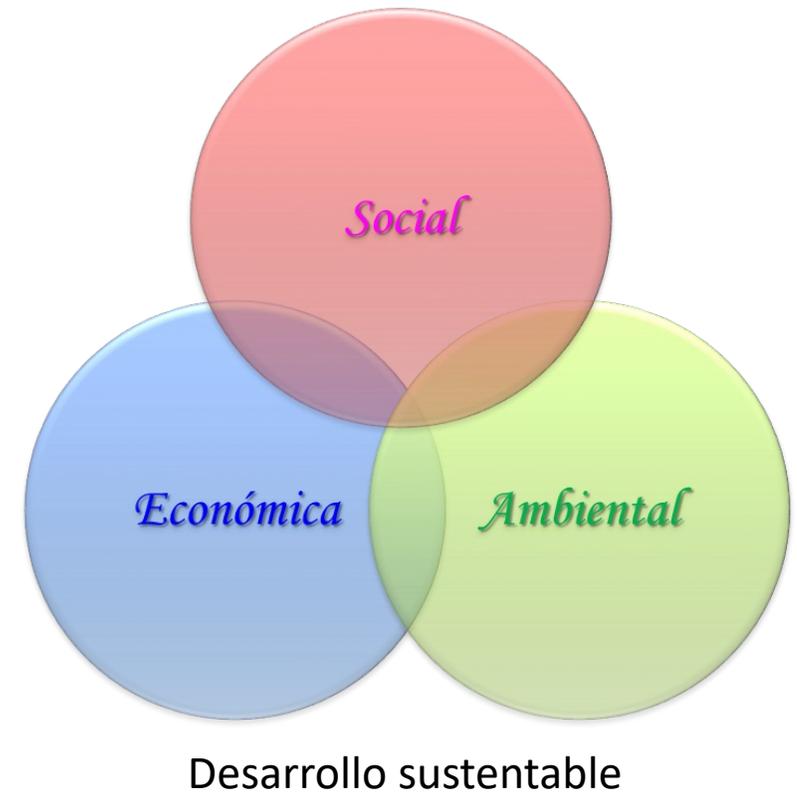
Tipos de sistemas termodinámicos

- **Sistema abierto:**
intercambia masa y energía con sus alrededores
- **Sistema cerrado:**
no intercambia masa, sólo energía
- **Sistema aislado:**
no intercambia ni masa ni energía
[¿ *existen en el universo* ?]
- Los seres vivos, los ecosistemas y la economía humana son sistemas abiertos

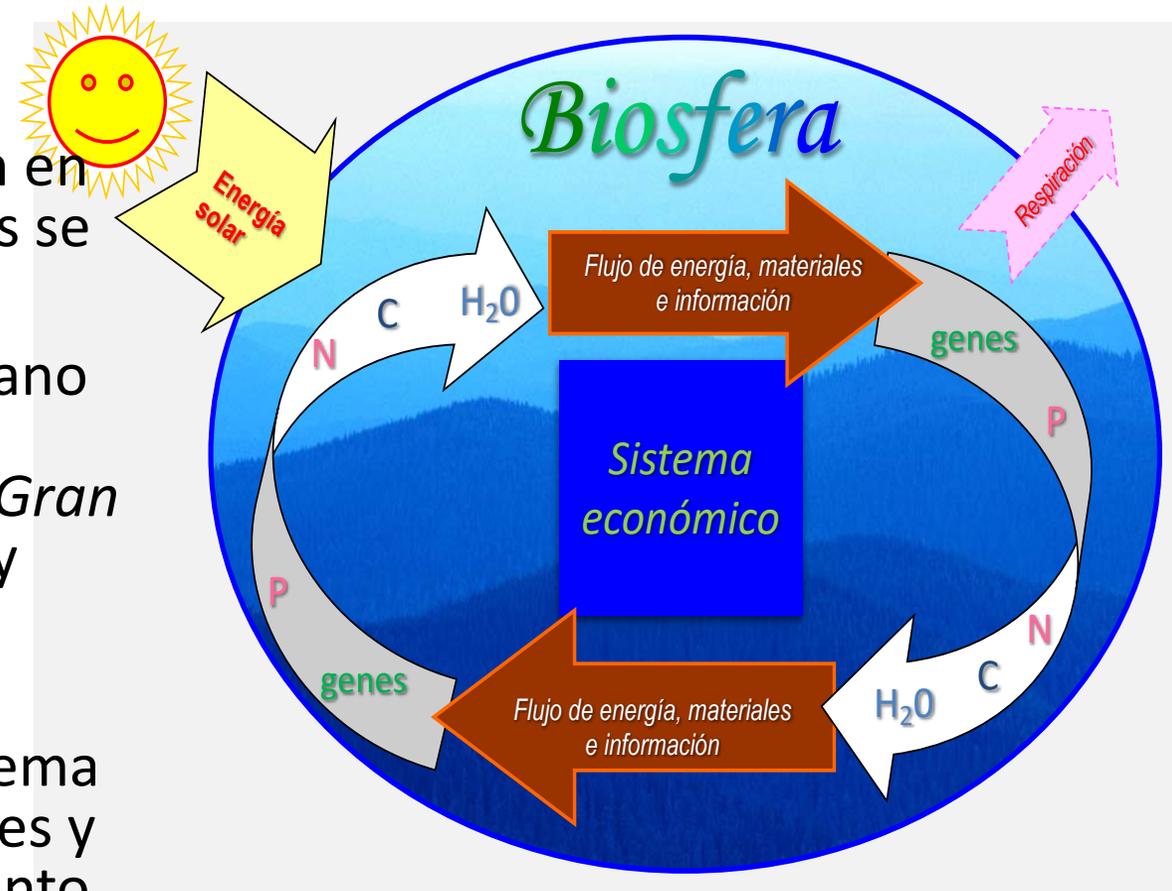
Un sistema termodinámico cerrado



La teoría económica supone que el sistema está compuesto por capital construido, capital humano y capital natural



- La ecología funcional estudia el flujo de energía y materiales en los ecosistemas, que fluyen a través de los seres vivos en la pirámide y redes tróficas
- Los ecosistemas se mantienen en equilibrio termodinámico en términos de entradas y salidas de energía y materiales, que circulan en su interior y entre ellos; todos los materiales se reciclan
- Por el contrario, el sistema económico humano (SEH), se encuentra en desequilibrio termodinámico porque entre más crece (la *Gran Aceleración*) mayor cantidad de materiales y energía requiere; y cada vez genera más desechos y disipa más energía no utilizable
- El SEH es en realidad un subsistema del sistema Biosfera, del que obtiene todos los materiales y la energía que requiere para su mantenimiento



Nicholas Georgescu-Roegen

- 4 de febrero 1906 en Constanța, Rumania y 30 de octubre 1994 en Nashville, Tennessee
- Matemático primero, economista después, fundador del enfoque termodinámico del proceso económico (1971) y de la Bioeconomía (enfoque alternativo a la economía neoclásica)
- Sus trabajos constituyen
 - los fundamentos de la Economía Ecológica (*International Society of Ecological Economics*, <http://www.isecoeco.org>) y
 - la inspiración de los diversos movimientos del Decrecimiento (*Degrowth, Décroissance*)

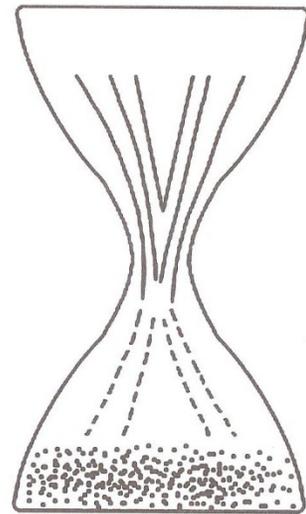


Termodinámica y proceso económico

- La transferencia de energía térmica, o calor, entre dos cuerpos a temperatura diferente, fluye del más caliente al menos caliente⁺
- La energía y la materia no se crean ni se destruyen, solo se transforman de una forma a otra*
- Pero cada vez que se realiza una transformación, parte de la energía o de la materia se disipa como energía o materia no utilizable** Este es el concepto básico de ENTROPIA
- Por consiguiente, el universo tiende al caos***
- El proceso económico está sujeto a esta Ley de la naturaleza. Cada vez que se realiza un trabajo, una parte de la energía y la materia utilizadas permite obtener el producto, pero otra parte se pierde en forma de calor y desechos
- En términos de Nicholas Georgescu-Roegen, en el proceso económico, energía y materiales de **baja entropía** (utilizables para la producción) permiten obtener un producto, pero una parte de ellos queda como energía y materiales de **alta entropía**

El «reloj de arena» de la entropía

Universo



El universo, entropía

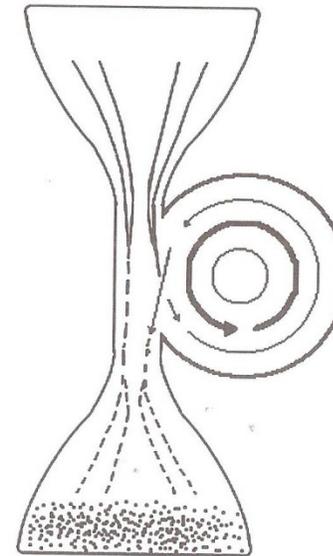
baja entropía



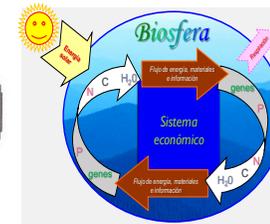
alta entropía

Biosfera

neguentropía



La biosfera, neguentropía

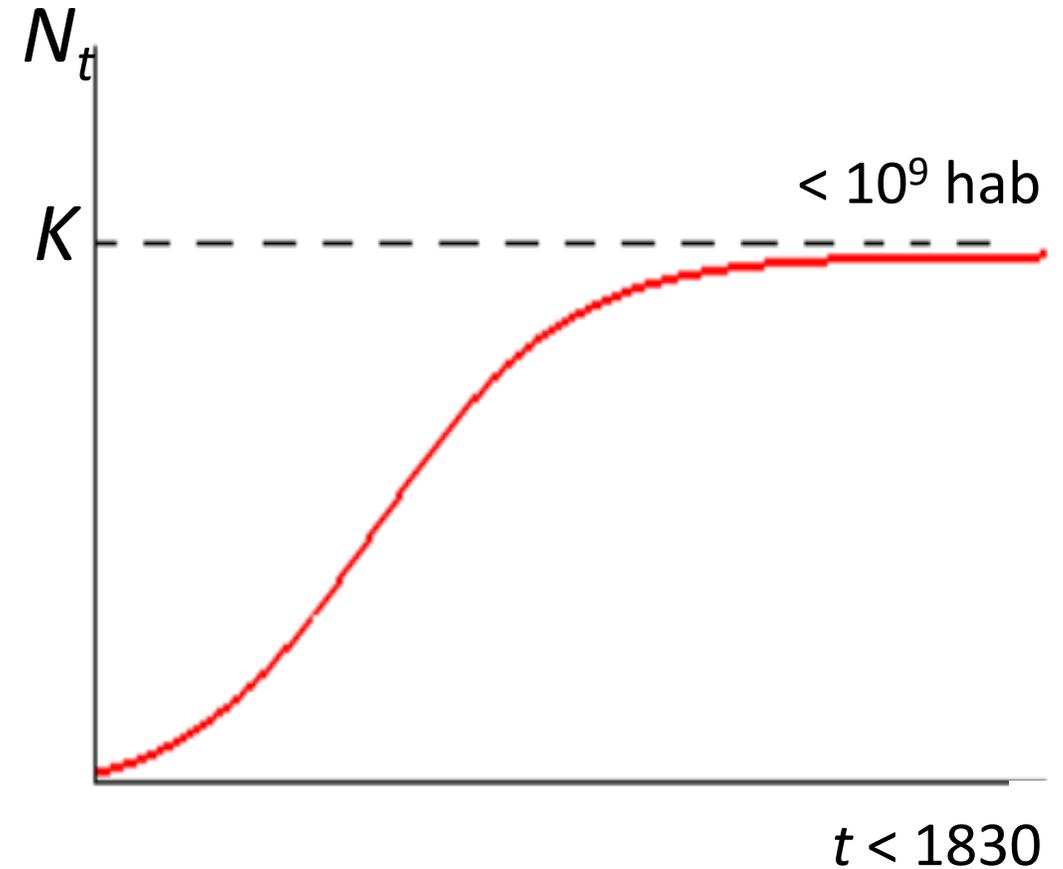


Cuencas de energía disponible y cuencas de entropía

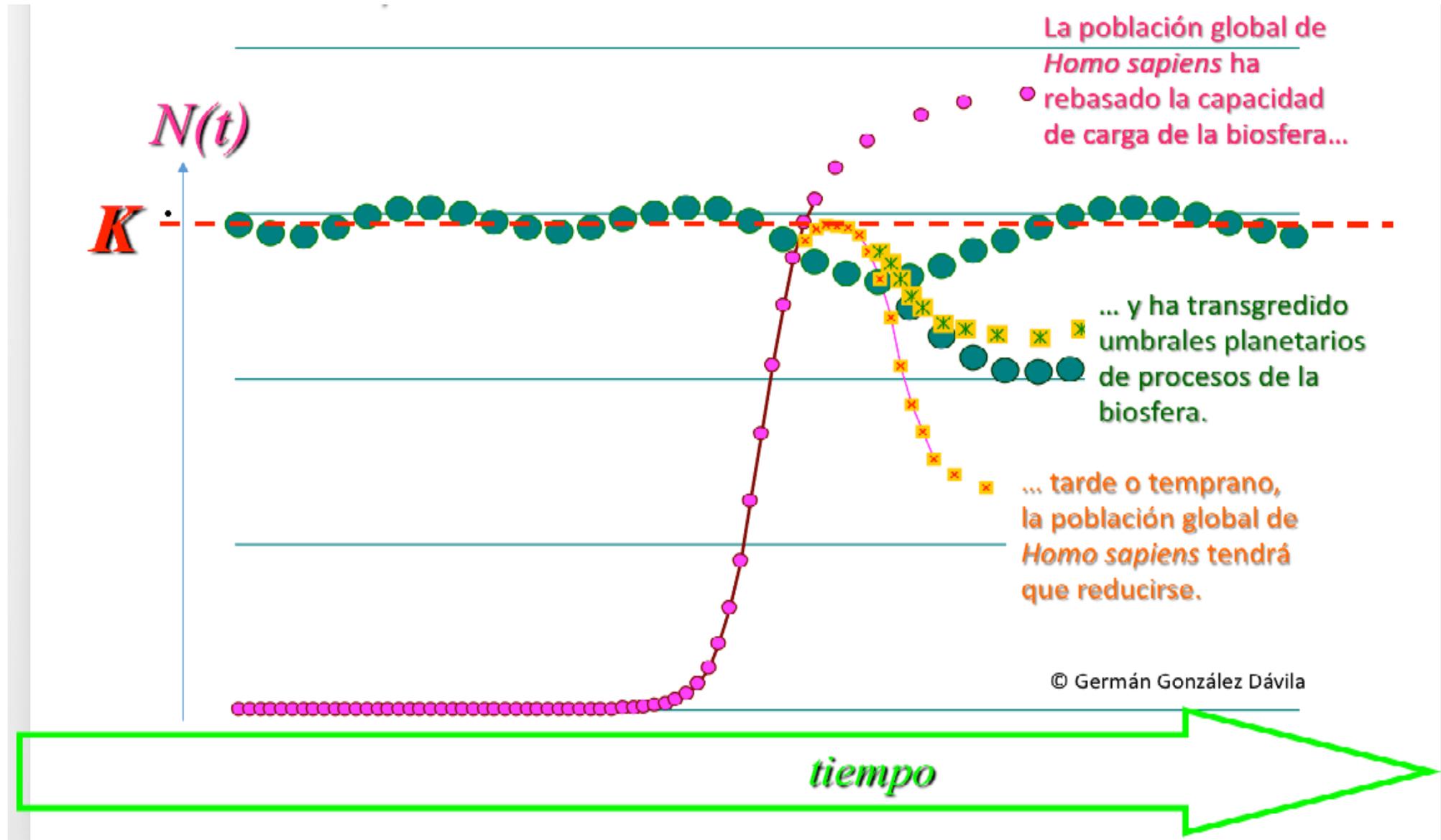
- En el curso de la Historia, las poblaciones y civilizaciones de *Homo sapiens* florecen y permanecen cuando encuentran «cuencas de energía de baja entropía»
- Entran en crisis cuando se agota la «cuenca de energía disponible», entonces migran para colonizar nuevas cuencas de baja entropía, o colapsan y desaparecen al caer en una «cuenca de entropía»
- Ejemplos:
 - Los cazadores – recolectores eran nómadas porque tenían que encontrar continuamente cuencas de energía
 - Cuando agotaron sus recursos forestales (s. XIII a s. XVI), los europeos cayeron en una cuenca de entropía que implicó regresiones económicas y poblacionales, hasta que sustituyeron la leña con carbón y accedieron a una nueva cuenca de energía (... e iniciaron la colonización del mundo)
 - Actualmente nos encontramos finalizando la última cuenca de energía —la más grande que *Homo sapiens* haya utilizado—, de los combustibles fósiles; y el horizonte de un futuro más próximo que lejano indica que sobrevendrá una cuenca de entropía y será imperativo resolver una cuenca alternativa de energía aprovechable...

Capacidad de carga

- Las implicaciones termodinámicas del crecimiento poblacional exponencial de *Homo sapiens* son preocupantes
- La época preindustrial, con todos sus avances científicos y tecnológicos mostró que la capacidad de carga de la biosfera es menor que mil millones de habitantes

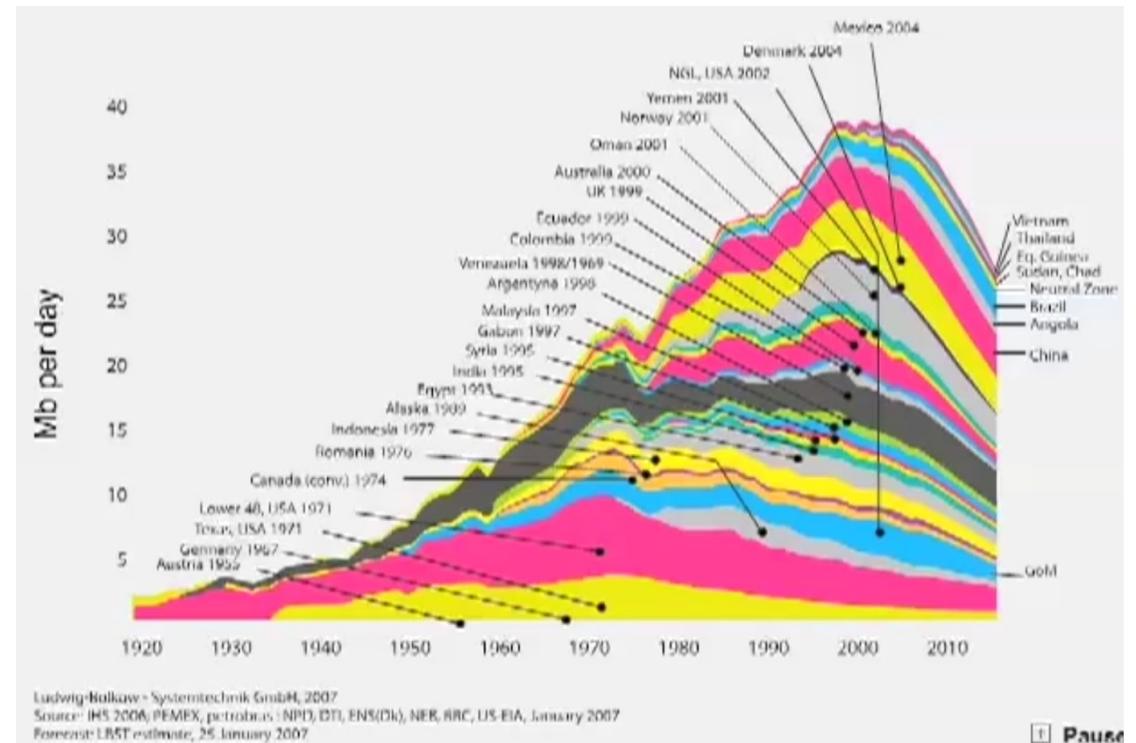


Transgresión de la capacidad de carga de la biosfera para *Homo sapiens*



Minerales: la otra frontera

- La curva de Hubbert
 - El pico del petróleo
 - Aplicable a minerales estratégicos
- Nicholas Georgescu-Roegen
 - Considerando S el stock total de un mineral estratégico y r la tasa anual de extracción: S/r es el número de años que durará el recurso.
 - Las tasas de extracción se han elevado con la *Gran Aceleración*, por lo que muchos recursos se agotarán más rápidamente

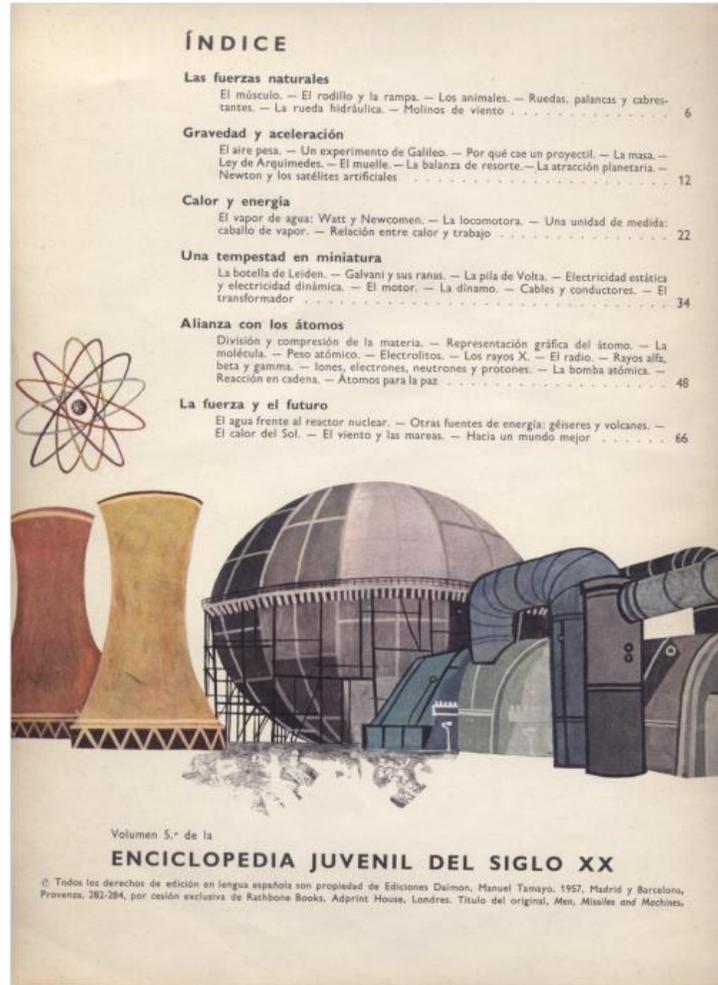


Sustentabilidad fuerte

- Mientras la base de sustentación de la civilización fueron las **energías de flujo**, *Homo sapiens* era “naturalmente” **sustentable**, ya que no podía rebasar ciertos límites de los sistemas biofísicos



Insustentabilidad creciente



- Pero a partir de que las energías de stock devinieron la base de sustentación de la civilización industrial, *Homo sapiens* ha transgredido paulatinamente umbrales planetarios de procesos biofísicos fundamentales para el equilibrio biogeoquímico y termodinámico de la biosfera

Hacia una cultura de baja entropía

- Decrecimiento
- Retirada estratégica
- Abandonar el paradigma del dominio sobre la Naturaleza
- Nueva Edad Solar
 - Reconstituir las bases civilizatorias de *Homo sapiens*
 - Establecer la paz con la Naturaleza
 - Menos es más
 - No será fácil. El problema es cómo podremos realizar el cambio...
- Parafraseando a Nicholas Georgescu-Roegen:
 - ¿Será capaz *Homo sapiens* de reducir su adicción al confort exosomático?
Quizás su destino sea tener una historia corta, frenética, materialista y extravagante, en lugar de una existencia larga, modesta, espiritual y equitativa... Otras especies, sin ambiciones espirituales, heredarán esta Tierra rebosante de energía solar...