Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), septiembre-octubre 2026,
Volumen 10, Número 5.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i5

ASIMETRÍA DIMENSIONAL ENTRE B Y HE EN NUEVE PAÍSES OCDE (1961–2019): UNA APLICACIÓN DE LA ENTROPÍA ESTRUCTURAL

DIMENSIONAL ASYMMETRY BETWEEN BIOCAPACITY AND ECOLOGICAL FOOTPRINT IN NINE OECD COUNTRIES (1961–2019): AN APPLICATION OF STRUCTURAL ENTROPY

Lorena Muñoz del Campo
Universitat de Lleida, Spain

Igor Parra Vergara
Universitat de Lleida, Spain

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i5.26752

Asimetría dimensional entre B y HE en nueve países OCDE (1961–2019): una aplicación de la entropía estructural

Lorena Muñoz del Campo[1]

munoz.lorena@icloud.com

https://orcid.org/0000-0002-0986-1582

Universitat de Lleida, Spain

Igor Parra Vergara

igorparra@fundacionatapuerca.es

https://orcid.org/0000-0001-6179-4391

Universitat de Lleida, Spain

RESUMEN

Este artículo aplica la metodología de entropía estructural basada en matrices de orden 6×6 a nueve países de la OCDE: Chile, Colombia, México, Canadá, Estados Unidos, Francia, Alemania, Reino Unido y Japón, durante el período 1961–2019. Se analizan los determinantes de la biocapacidad (B) y la huella ecológica (HE), las entropías de Shannon calculadas sobre valores singulares normalizados y el balance entrópico en diez bloques sexenales, totalizando noventa bloques de análisis. Los resultados muestran que la entropía de HE supera a la de B en los noventa bloques analizados, sin excepción, lo que revela una asimetría dimensional universal y persistente. Se identifican tres trayectorias estructurales diferenciadas: convergencia sostenida (Alemania y Reino Unido), divergencia persistente (Chile, Colombia y Canadá) y convergencia por empobrecimiento (México). Asimismo, se distinguen cuatro fases históricas: expansión y diversificación (1961–1972), reconfiguración por crisis energéticas (1973–1984), globalización y desindustrialización (1985–2002) y concentración y convergencia parcial (2003–2019). El análisis muestra que un balance entrópico bajo no es indicador de sostenibilidad y que la diversidad estructural y la magnitud del sistema son dimensiones independientes. La metodología propuesta complementa la suma anual al capturar la evolución estructural del sistema y su empobrecimiento o diversificación dimensional a lo largo del tiempo.

Palabras clave: asimetría dimensional, países OCDE, entropía estructural, B, HE

[1] Autor principal
Correspondencia: munoz.lorena@icloud.com

Dimensional Asymmetry Between Biocapacity and Ecological Footprint in Nine OECD Countries (1961–2019): An Application of Structural Entropy

ABSTRACT

This article applies the structural entropy methodology based on 6×6 matrices to nine OECD countries: Chile, Colombia, Mexico, Canada, the United States, France, Germany, the United Kingdom, and Japan, over the period 1961–2019. We analyze the determinants of biocapacity (B) and ecological footprint (EF), the Shannon entropies calculated over normalized singular values, and the entropy balance across ten six-year blocks, totaling ninety blocks of analysis. Results show that EF entropy exceeds B entropy in all ninety blocks analyzed, without exception, revealing a universal and persistent dimensional asymmetry. Three differentiated structural trajectories are identified: sustained convergence (Germany and the United Kingdom), persistent divergence (Chile, Colombia, and Canada), and convergence through impoverishment (Mexico). Likewise, four historical phases are distinguished: expansion and diversification (1961–1972), reconfiguration due to energy crises (1973–1984), globalization and deindustrialization (1985–2002), and concentration and partial convergence (2003–2019). The analysis shows that a low entropy balance is not an indicator of sustainability and that structural diversity and system magnitude are independent dimensions. The proposed methodology complements annual summation by capturing the structural evolution of the system and its dimensional impoverishment or diversification over time.

***Keywords**:* dimensional asymmetry, OECD countries, structural entropy, biocapacity, ecological footprint

Artículo recibido 20 agosto 2026

Aceptado para publicación: 27 septiembre 2026

INTRODUCCIÓN

La medición convencional de B y la HE se basa en la suma anual de sus componentes, lo que equivale a una fotografía estática que pierde las interrelaciones temporales y no permite evaluar la dinámica del sistema (Borucke et al., 2013). Los autores proponen un enfoque metodológico basado en el tratamiento matricial del sistema: matrices cuadradas de orden 6×6 construidas con ventanas temporales consecutivas de seis años, a partir de las cuales se calculan el determinante, los valores singulares y la entropía de Shannon sobre valores singulares normalizados. La incorporación del carbono en la B, ausente en los National Footprint Accounts, se realiza a partir del límite planetario de 1,6 tCO_2e per cápita (O'Neill et al., 2018). El presente artículo aplica esta propuesta metodológica a nueve países de la OCDE: Chile, Colombia, México, Canadá, Estados Unidos, Francia, Alemania, Reino Unido y Japón. Los países latinoamericanos (Chile, Colombia y México) presentan economías basadas en la explotación de recursos naturales, con procesos de deforestación documentados y una B concentrada en productos forestales y tierras de cultivo. Las economías europeas (Francia, Alemania y Reino Unido) han atravesado procesos profundos de desindustrialización y transición energética, con una HE que ha evolucionado desde una composición diversificada hacia una creciente dominancia del carbono. Canadá y Estados Unidos combinan una alta disponibilidad de recursos naturales con patrones de consumo intensivos en carbono. Japón representa el caso extremo de dependencia estructural de importaciones de recursos, con una B doméstica limitada

El objetivo es evaluar empíricamente la evolución de la asimetría dimensional entre B y HE, identificar las trayectorias estructurales diferenciadas y periodizar los cambios observados. La pregunta empírica que guía el análisis es la siguiente: ¿cómo ha evolucionado la diversidad estructural de la oferta y la demanda ecológicas en estos nueve países a lo largo de seis décadas, y qué patrones comunes y diferencias pueden identificarse?

La hipótesis central es que la asimetría dimensional entre B y HE es universal y persistente, pero que su evolución temporal responde a trayectorias diferenciadas según el perfil estructural de cada país. Se espera identificar los tipos de trayectoria y los puntos de inflexión —variaciones significativas en la magnitud del determinante y en la distribución de los valores singulares— asociados a eventos históricos

específicos: crisis energéticas, reunificaciones políticas, procesos de desindustrialización y transiciones energéticas.

METODOLOGÍA

Período de análisis y datos

El período de análisis es 1961–2019. Se excluyen los años 2020–2021 por los efectos atípicos de la pandemia de COVID-19 y los años 2022–2025 por corresponder a estimaciones no verificadas de la Global Footprint Network. Se utilizan los datos desagregados de B y HE por componente de la Global Footprint Network (2022). Para el cálculo de B de Carbono, la población de cada país y año se obtuvo del Banco Mundial (World Bank, 2021).

Incorporación del carbono en la B

La La Biocapacidad, tal como se define en los National Footprint Accounts, no incluye un componente de carbono. Sus cinco categorías —suelo urbanizado, tierras de cultivo, zonas de pesca, productos forestales y pastizales— representan superficies biológicamente productivas. Esta asimetría estructural implica que una matriz de B construida con seis columnas contiene una columna de ceros y su determinante es nulo. Para superar esta limitación, se incorpora el carbono en la B a partir del límite planetario de 1,6 tCO_2e per cápita (O'Neill et al., 2018), convertido a hectáreas globales según la metodología de la Global Footprint Network (2022). La conversión se realiza multiplicando la población de cada año por el límite planetario per cápita y por el factor de conversión derivado de los propios datos de la red.

La incorporación del carbono en la B no es una decisión neutral: introduce una columna normativa que representa la demanda de absorción compatible con el límite planetario, no una superficie biológicamente productiva observada. Esta distinción es importante porque la B convencional mide oferta regenerativa, mientras que el carbono normativo mide una restricción de sostenibilidad. Al incluirla, la matriz de B deja de ser una descripción puramente positiva del sistema y pasa a incorporar un criterio normativo. Esta elección se justifica por tres razones. Primera, sin ella la matriz de B contiene una columna de ceros y su determinante es nulo por construcción, lo que impide cualquier análisis de independencia lineal. Segunda, la HE sí incluye el carbono como componente, de modo que excluirlo

de la B introduce una asimetría artificial en la comparación. Tercera, el límite planetario de 1,6 tCO_2e per cápita (O'Neill et al., 2018) proporciona un criterio externo y reproducible para definir la columna. No obstante, los resultados deben interpretarse teniendo presente que esta columna es normativa y que definiciones alternativas podrían modificar el balance entrópico. Por esta razón, en la sección 4.4 se presenta un análisis de sensibilidad que compara tres variantes: (i) B sin carbono (determinante nulo por construcción, no interpretable); (ii) carbono dependiente de la población, según el procedimiento aquí descrito; y (iii) carbono constante en 1,6 tCO_2e per cápita sin ajuste poblacional. Las variantes (ii) y (iii) producen entropías de B que difieren en menos de 0,05 nats en la mayoría de los bloques, lo que sugiere que la conclusión principal —asimetría dimensional entre HE y B— es robusta a la definición del carbono, aunque la magnitud exacta del balance depende de ella.

Matrices móviles 6×6 y métricas

Se construyen matrices cuadradas de orden 6×6 con ventanas temporales consecutivas de seis años, con un solapamiento mínimo de un año en el tramo final. Aplicado al período 1961–2019, se obtienen diez bloques: 1961–1966, 1967–1972, 1973–1978, 1979–1984, 1985–1990, 1991–1996, 1997–2002, 2003–2008, 2009–2014 y 2014–2019. A partir de estas matrices se calculan determinantes, valores singulares y entropía de Shannon. El determinante mide la independencia lineal entre los vectores fila: valores absolutos elevados indican mayor independencia lineal; valores cercanos a cero indican colapso dimensional. Esta métrica es distinta de la entropía estructural de Shannon, que se calcula sobre los valores singulares normalizados: una entropía alta indica diversidad dimensional equilibrada, mientras que una entropía baja indica concentración de la varianza en pocas dimensiones. Los valores singulares, obtenidos mediante descomposición SVD ($X = U\Sigma V^T$), identifican la dispersión de la matriz a lo largo de direcciones ortogonales. La entropía de Shannon sobre valores singulares normalizados, expresada en nats, cuantifica el grado de diversidad o empobrecimiento estructural del sistema. El balance entrópico se define como Δ = Entropía HE – Entropía B

Los valores positivos indican que la HE está más diversificada entre componentes que la B; valores negativos indican lo contrario.

RESULTADOS

Los resultados que se presentan a continuación aplican la metodología de entropía estructural a los nueve países de la OCDE en los diez bloques sexenales del período 1961–2019, totalizando noventa bloques de análisis. Para cada país y cada bloque se calcularon el determinante de la matriz de datos, los valores singulares obtenidos mediante descomposición SVD, la entropía de Shannon sobre valores singulares normalizados y el balance entrópico definido como la diferencia entre la entropía de la huella ecológica (HE) y la de la biocapacidad (B). La presentación se organiza país por país, comenzando por los casos latinoamericanos (Chile, Colombia y México), continuando por las economías europeas (Francia, Alemania y Reino Unido), y finalizando con Canadá, Estados Unidos y Japón. Para cada país se describe la evolución temporal de las entropías de B y HE, la magnitud del determinante y su relación con procesos históricos específicos —deforestación, desindustrialización, transiciones energéticas y crisis económicas—, y se interpreta el balance entrópico resultante. El conjunto de los noventa bloques permite identificar patrones comunes y trayectorias diferenciadas que se sintetizan en la sección de Discusión. Los resultados confirman la hipótesis central: la entropía de HE supera a la de B en todos los bloques analizados, sin excepción, lo que revela una asimetría dimensional universal y persistente entre oferta y demanda ecológicas.

Chile

Chile presenta tres puntos de cruce entre B y HE (1995, 2004 y 2008). En 1995, B ≈ 3,91 hag/hab y HE ≈ 3,92 hag/hab; en 2004, B ≈ 3,70 y HE ≈ 3,71; en 2008 la B cae por debajo de la HE de manera permanente (B = 3,49 hag/hab; HE = 3,82 hag/hab). Hacia 2019, el déficit se había ampliado a 0,9 hag/hab (B = 3,4; HE = 4,3) (País Circular, 2021; Muñoz del Campo y Parra Vergara, 2026a). El patrón estructural se caracteriza por una asimetría dimensional persistente entre una HE relativamente diversificada y una B fuertemente concentrada: la entropía de la huella es la más alta de la muestra en ocho de los diez bloques, con un máximo de 0,551 en 2003–2008, mientras que la entropía de B se mantiene en un rango estrecho (0,067–0,133), reflejando la concentración de la oferta en uno o dos componentes, principalmente productos forestales y tierras de cultivo (Tabla 1).

Tabla 1 – Métricas estructurales por período para Chile

Período	det(B)	det(HE)	Entropía B	Entropía HE	Δ entropía
1961–1966	-9,33e+28	-6,13e+33	0,067	0,401	0,334
1967–1972	-4,30e+31	-9,13e+34	0,087	0,487	0,400
1973–1978	-5,30e+32	2,19e+35	0,113	0,471	0,358
1979–1984	-5,00e+31	-1,57e+36	0,074	0,549	0,475
1985–1990	1,04e+32	9,15e+35	0,108	0,443	0,335
1991–1996	-5,18e+31	2,90e+36	0,081	0,417	0,336
1997–2002	1,51e+34	2,47e+37	0,133	0,422	0,288
2003–2008	-8,71e+32	2,32e+38	0,078	0,551	0,473
2009–2014	5,45e+32	3,33e+37	0,098	0,338	0,240
2014–2019	-9,05e+32	-1,67e+37	0,089	0,301	0,212

Fuente: elaboración propia a partir de Global Footprint Network (2022) y O'Neill et al. (2018).

La evolución de la entropía de HE permite distinguir tres fases. La primera (1961–1984) se caracteriza por valores altos y crecientes, con un máximo de 0,549 en 1979–1984. La segunda (1985–2002) muestra una meseta en torno a 0,42–0,44, con un descenso moderado respecto al máximo anterior. La tercera (2003–2019) registra una caída pronunciada desde 0,551 en 2003–2008 hasta 0,301 en 2014–2019, lo que indica una concentración progresiva de la demanda en un número menor de componentes —muy probablemente el carbono— a medida que se expande el consumo de combustibles fósiles y disminuyen relativamente los componentes asociados a productos forestales, pesca y pastizales. El balance entrópico es positivo en todos los bloques, con un máximo de 0,475 en 1979–1984 y un mínimo de 0,212 en 2014–2019; esta convergencia final se produce por concentración de HE, no por diversificación de B, y por tanto no implica una mejora de la sostenibilidad.

El valor absoluto del determinante de B presenta variaciones de magnitud en siete de los diez bloques. Estas variaciones indican que la configuración de dependencia entre los vectores anuales de B se reorganiza repetidamente; en términos de sistemas dinámicos, los cambios en la magnitud del determinante y en la distribución de los valores singulares sugieren puntos de inflexión en los que la estructura de la oferta ecológica pasa de una configuración a otra cualitativamente distinta (Carbonell y Parra, 2024). La secuencia de magnitudes sugiere que la B chilena no ha seguido una trayectoria monotónica de degradación, sino un proceso de reconfiguraciones sucesivas en las que la pérdida de bosque nativo y su sustitución por plantaciones exóticas se combinan con la expansión agrícola, los

cambios en el uso del suelo y las variaciones en las superficies de pastizales (Donoso y Lara, 1996; Bahamóndez et al., 2020).

En términos históricos, la quema de aproximadamente 3,5 millones de hectáreas entre las décadas de 1920 y 1960, seguida por la sustitución de bosque nativo por plantaciones de *Eucalyptus globulus* y *Pinus radiata* (Bahamóndez et al., 2020; BCN, 1994), transformó la composición de la oferta ecológica: las plantaciones de crecimiento rápido mantienen una superficie productiva comparable a la del bosque nativo, pero su contribución al almacenamiento de carbono, la regulación hídrica y la biodiversidad es significativamente menor. Cada vez que la estructura de la oferta cambia de manera significativa, la configuración de dependencia entre los vectores anuales se reorganiza y la magnitud del determinante se modifica. Esta reorganización sucesiva es la que reflejan las variaciones del determinante y de la distribución de los valores singulares a lo largo del período.

Colombia

Colombia muestra una disminución significativa en zonas de pesca y productos forestales. Entre 2001 y 2021, la deforestación afectó a 3.182.876 hectáreas, de las cuales 1.858.285 se localizaban en la Amazonía colombiana (Martino, 2007); las principales causas son la invasión y el acaparamiento de tierras, las malas prácticas ganaderas, el cultivo de ilícitos y la expansión no planificada de infraestructuras (Alzate Rodríguez, 2022). El patrón estructural comparte con Chile la asimetría dimensional entre una HE más diversificada y una B concentrada, pero difiere en la magnitud de esa asimetría y en su evolución temporal. La entropía de B oscila entre 0,061 y 0,136, entre las más bajas de la muestra, mientras que la entropía de HE varía entre 0,180 y 0,381; la diferencia sistemática de ≈0,15 unidades entre los promedios configura una asimetría persistente que se mantiene en los diez bloques sin excepción (Tabla 2).

Tabla 2 – Métricas estructurales por período para Colombia

Período	det(B)	det(HE)	Entropía B	Entropía HE	Δ entropía
1961–1966	-6,47e+34	1,88e+34	0,094	0,180	0,086
1967–1972	6,29e+33	4,68e+34	0,082	0,219	0,137
1973–1978	6,21e+33	4,97e+35	0,072	0,224	0,152
1979–1984	-1,08e+22	-2,29e+35	0,085	0,211	0,125
1985–1990	3,63e+33	8,77e+35	0,072	0,230	0,158
1991–1996	-3,00e+35	4,60e+36	0,097	0,264	0,167
1997–2002	1,65e+36	-1,55e+37	0,136	0,262	0,126
2003–2008	-1,61e+34	-1,41e+35	0,061	0,211	0,150
2009–2014	-2,11e+35	-2,08e+36	0,114	0,381	0,267
2014–2019	5,40e+35	1,38e+37	0,111	0,281	0,170

Fuente: elaboración propia a partir de Global Footprint Network (2022) y O'Neill et al. (2018) .
Nota: el valor de det(B) en 1979 – 1984 (-1,08e+22) es varios órdenes de magnitud inferior al resto de bloques. Esto sugiere que la matriz de B Colombia estuvo cerca de la singularidad en ese período probablemente por redundancia estructural entre vectores.

La evolución de la entropía de HE muestra tres fases. La primera (1961–1990) se caracteriza por valores relativamente estables (0,180–0,230). La segunda (1991–2002) muestra un aumento sostenido, alcanzando 0,264 en 1991–1996 y 0,262 en 1997–2002. La tercera (2003–2019) presenta la mayor variabilidad: un descenso a 0,211 en 2003–2008, seguido de un máximo de 0,381 en 2009–2014 —el más alto de toda la serie— y un descenso a 0,281 en 2014–2019. El máximo de 2009–2014 coincide con el período de mayor conflictividad territorial en Colombia y con el aumento de la deforestación amazónica (Martino, 2007; Alzate Rodríguez, 2022), lo que sugiere que la diversificación de HE en ese bloque podría estar asociada a una mayor contribución relativa de componentes como tierras de cultivo y productos forestales vinculados a la expansión agrícola y ganadera. El balance entrópico es positivo en todos los bloques, con un mínimo de 0,086 en 1961–1966 y un máximo de 0,267 en 2009–2014; el descenso a 0,170 en 2014–2019, aunque moderado, es significativo porque indica una reducción de la asimetría dimensional. El valor absoluto del determinante de B presenta variaciones de magnitud en ocho de los diez bloques. Estas variaciones indican que la configuración de dependencia entre los vectores anuales de B se reorganiza repetidamente; en términos de sistemas dinámicos, los cambios en

la magnitud del determinante y en la distribución de los valores singulares sugieren puntos de inflexión en los que la estructura de la oferta ecológica pasa de una configuración a otra cualitativamente distinta (Carbonell y Parra, 2024). El caso colombiano ilustra además un fenómeno que no aparece con la misma claridad en los otros países: la desconexión entre magnitud y diversidad estructural. Colombia mantiene una relación entre HE y B inferior a la unidad en términos de magnitud (la HE representa aproximadamente el 46 % de la B en el último período, lo que indica un superávit ecológico aparente), pero la asimetría dimensional es alta ($\Delta = 0{,}170$), lo que revela que la estructura de la oferta y la de la demanda siguen configuraciones muy distintas. Un país puede tener un balance de magnitud positivo y, simultáneamente, una estructura dimensional asimétrica que lo hace vulnerable a perturbaciones específicas en los componentes dominantes de cada sistema.

Mexico

México México muestra un único punto de cruce entre B y HE en 1976 (B ≈ 6,66 hag/hab; HE ≈ 6,84 hag/hab). Hacia 2019, la B per cápita se había reducido a 1,2 hag/hab frente a una HE de 2,5 hag/hab, lo que implica que se necesitarían más de dos México para satisfacer la demanda de recursos de su población (En Plan Planeta, 2025).

Tabla 3 – Métricas estructurales por período para Mexico

Período	det(B)	det(HE)	Entropía B	Entropía HE	Δ entropía
1961–1966	-1,40e+33	5,09e+36	0,134	0,227	0,093
1967–1972	1,40e+36	9,71e+35	0,136	0,304	0,168
1973–1978	2,42e+35	1,04e+38	0,136	0,272	0,136
1979–1984	-1,72e+36	2,06e+38	0,145	0,229	0,084
1985–1990	-3,72e+35	-3,06e+36	0,103	0,192	0,089
1991–1996	6,07e+33	1,14e+39	0,104	0,332	0,228
1997–2002	1,84e+34	4,64e+40	0,099	0,347	0,248
2003–2008	2,10e+36	-1,02e+40	0,112	0,222	0,110
2009–2014	-1,20e+35	2,92e+40	0,107	0,212	0,105
2014–2019	-2,78e+35	-2,24e+38	0,100	0,112	0,012

Fuente: elaboración propia a partir de Global Footprint Network (2022) y O'Neill et al. (2018) .

La evolución de la entropía de HE en México muestra un máximo de 0,347 en 1997–2002, seguido de un descenso progresivo hasta 0,112 en 2014–2019, en línea con el aumento del consumo de combustibles fósiles y la intensificación agrícola documentados para el período (Koleff et al., 2009; Victoria-Hernández et al., 2011). En términos históricos, México ha perdido más de 23 millones de hectáreas de selvas, casi 13 millones de hectáreas de bosques, 5,9 millones de hectáreas de matorrales y

6,7 millones de hectáreas de pastizales respecto a sus valores originales (Koleff et al., 2009), y en las últimas décadas ha perdido más de 50.000 hectáreas de bosques y matorrales por año (Victoria-Hernández et al., 2011). Esta pérdida de superficie forestal se traduce en una reducción del componente de productos forestales en la B, que a su vez reduce la entropía de B en la medida en que el sistema se concentra en los componentes restantes. La convergencia dimensional mexicana no es un fenómeno espontáneo, sino el resultado de la degradación de la oferta ecológica que acompaña a la concentración de la demanda.

Francia

Francia experimentó una disminución significativa en pastizales y una ligera reducción en productos forestales, junto con un aumento en tierras de cultivo (Global Footprint Network, 2022), y mantiene un déficit ecológico persistente, con una HE que ha superado a la B en todos los períodos analizados. Su particularidad es que posee la entropía de B más alta del último período (0,181), lo que indica una estructura de oferta relativamente diversificada entre sus seis componentes. Este valor es prácticamente el doble del que presentan Alemania (0,110), Colombia (0,111) o Reino Unido (0,098), y seis veces superior al de Japón (0,034). La diversificación estructural de la B francesa sugiere que, a diferencia de los países latinoamericanos o de Japón, la oferta ecológica francesa no está dominada por un único componente, sino que distribuye su magnitud entre superficies forestales, tierras de cultivo, pastizales y zonas de pesca de manera relativamente equilibrada (Tabla 4).

Tabla 4 – Métricas estructurales por período para Francia

Período	det(B)	det(HE)	Entropía B	Entropía HE	Δ entropía
1961–1966	-2,21e+35	5,99e+37	0,088	0,151	0,063
1967–1972	4,01e+36	2,73e+40	0,110	0,305	0,195
1973–1978	-4,78e+34	1,06e+39	0,094	0,168	0,074
1979–1984	3,23e+34	2,61e+40	0,094	0,273	0,179
1985–1990	2,25e+34	7,83e+39	0,098	0,250	0,152
1991–1996	-3,31e+35	-5,35e+39	0,097	0,228	0,131
1997–2002	6,40e+34	-6,67e+39	0,078	0,208	0,130
2003–2008	2,53e+34	1,19e+39	0,085	0,162	0,077
2009–2014	3,24e+34	-1,33e+40	0,062	0,186	0,124
2014–2019	2,80e+35	-4,78e+38	0,181	0,239	0,058

Fuente: elaboración propia a partir de Global Footprint Network (2022) y O'Neill et al. (2018) .

El determinante de B es el más estable de la muestra: negativo en los tres primeros bloques (1961–1966, 1967–1972, 1973–1978) y positivo de manera sostenida desde 1979 hasta 2019 La evolución de la entropía de HE sigue un patrón diferente, en U invertida: máximo inicial de 0,305 en 1967–1972, descenso progresivo en los bloques intermedios (0,228 en 1991–1996; 0,208 en 1997–2002; 0,162 en 2003–2008) y recuperación final hasta 0,239 en 2014–2019. Este patrón es análogo al de Chile, aunque con valores absolutos más bajos. La recuperación de la entropía de HE francesa en el último bloque coincide con una variación significativa en la magnitud del determinante de HE entre 2009–2014 (–1,33e+40) y 2014–2019 (–4,78e+38); en términos de sistemas dinámicos, los cambios en la magnitud del determinante y en la distribución de los valores singulares sugieren puntos de inflexión en los que la estructura de la oferta ecológica pasa de una configuración a otra cualitativamente distinta (Carbonell y Parra, 2024). El balance entrópico francés oscila entre 0,058 y 0,195, con un promedio de 0,118; es uno de los más bajos de la muestra, comparable al de Alemania (0,092) y al de México (0,124), y el valor del último período (0,058) es el tercero más bajo, después de México (0,012) y Alemania (0,030). Esta convergencia dimensional implica que la HE y la B francesas tienen una diversidad estructural comparable en el último bloque, aunque por razones distintas a las de México: en Francia, la B se ha diversificado (entropía B alta), mientras la HE se ha concentrado moderadamente (entropía HE intermedia). La convergencia se produce por una aproximación desde arriba —la B sube, la HE baja ligeramente—, no por una concentración simultánea como en el caso mexicano.

Alemania

Alemania destaca por las reducciones significativas en HE de zonas de pesca y HE de pastizales, así como por la reducción sostenida de su HE de carbono desde la década de 1980 (Global Footprint Network, 2022). El caso alemán representa el proceso de convergencia dimensional más sostenido de la muestra: el balance entrópico desciende desde un máximo de 0,339 en 1967–1972 hasta 0,030 en 2014–2019, con una tendencia monotónica a la baja desde 1973–1978. Este descenso sostenido a lo largo de cinco décadas es único entre los nueve países: ningún otro caso muestra una reducción tan consistente y prolongada de la asimetría dimensional (Tabla 5).

Tabla 5 – Métricas estructurales por período para Alemania

Período	det(B)	det(HE)	Entropía B	Entropía HE	Δ entropía
1961–1966	-1,09e+33	3,51e+40	0,045	0,212	0,167
1967–1972	1,67e+33	-3,29e+41	0,059	0,398	0,339
1973–1978	-3,50e+33	1,83e+41	0,050	0,188	0,138
1979–1984	9,35e+34	-2,40e+40	0,063	0,182	0,119
1985–1990	-9,49e+34	6,94e+39	0,076	0,119	0,043
1991–1996	2,15e+34	1,44e+39	0,081	0,135	0,054
1997–2002	-1,74e+35	1,15e+40	0,121	0,144	0,023
2003–2008	5,04e+34	-1,31e+40	0,091	0,198	0,107
2009–2014	-2 ,67e+35	1,34e+39	0,128	0,190	0,062
2014–2019	2,43e+35	-9,22e+38	0,110	0,140	0,030

Fuente: elaboración propia a partir de Global Footprint Network (2022) y O'Neill et al. (2018) .

La interpretación requiere distinguir entre la evolución de la entropía de B y la de HE. La entropía de B alemana oscila entre 0,045 y 0,128, con un aumento progresivo desde los valores mínimos de las décadas de 1960 y 1970 hasta los valores más altos de los bloques 1997–2002 (0,121) y 2009–2014 (0,128). Este aumento indica una diversificación gradual de la oferta ecológica alemana, probablemente asociada a la reforestación, la reconversión de superficies agrícolas y la expansión de áreas protegidas (Krausmann et al., 2018). La entropía de HE, en cambio, desciende desde un máximo de 0,398 en 1967–1972 hasta un mínimo de 0,119 en 1985–1990, con una recuperación parcial hasta 0,198 en 2003–2008 y un descenso posterior hasta 0,140 en 2014–2019. Esta evolución refleja la transición desde una HE diversificada hacia una HE dominada por el carbono, seguida por una reconfiguración asociada a la transición energética.

El mínimo de entropía de HE en 1985–1990 (0,119) coincide con el período inmediatamente anterior a la reunificación alemana; en términos de la interpretación estructural, sugiere que la HE de la República Federal de Alemania alcanzó su máxima concentración dimensional justo antes de integrar el territorio de la República Democrática Alemana. La reunificación, que se refleja en el bloque 1991–1996, introduce un cambio cualitativo: la magnitud del determinante de HE pasa de −1,36e+40 (1985–1990) a 3,33e+39 (1991–1996) y la entropía de HE se recupera hasta 0,135. Este patrón sugiere que la integración territorial introdujo nuevos patrones de consumo y producción que reconfiguraron la estructura de HE (Krausmann et al., 2018). El balance entrópico del último período (0,030) es el segundo más bajo de la muestra, después de México (0,012); sin embargo, la naturaleza de la convergencia es

distinta: en México se produce por concentración simultánea de ambos sistemas en pocos componentes, mientras que en Alemania se produce por una combinación de diversificación de B y concentración de HE. Los dos sistemas se acercan desde posiciones inicialmente opuestas: la B, que partió con entropía muy baja, ha aumentado; la HE, que partió con entropía alta, ha disminuido. El punto de encuentro es un valor intermedio (0,110 para B, 0,140 para HE) que refleja una configuración relativamente estable.

Reino Unido

El Reino Unido muestra una reducción significativa en casi todos los componentes de HE, especialmente en carbono, cuya HE cayó un 24 % entre 1990 y 2021 (UK Department for Business, Energy and Industrial Strategy, 2021). Presenta el mínimo absoluto de balance entrópico de la muestra en 2003–2008 (0,016), el valor más bajo registrado en cualquier bloque, lo que indica que en ese período la HE y la B británicas alcanzaron una diversidad estructural prácticamente idéntica. La coincidencia de este mínimo con el máximo de entropía de B de la serie (0,138) y el segundo valor más bajo de entropía de HE (0,154) sugiere que la convergencia se produjo por la aproximación simultánea de ambos sistemas hacia una configuración intermedia (Tabla 6). La evolución del balance entrópico muestra un patrón de tres fases. La primera (1961–1990) se caracteriza por valores altos y relativamente estables, en torno a 0,11–0,13. La segunda (1991–2008) muestra un descenso abrupto: 0,053 en 1991–1996, 0,088 en 1997–2002 y 0,016 en 2003–2008. La tercera (2009–2019) muestra una estabilización en valores bajos: 0,060 y 0,055. La transición entre la primera y la segunda fase coincide con el declive industrial y el desplazamiento de la actividad económica hacia el sector servicios, que transformó la composición de la HE de carbono y redujo la participación relativa de los componentes asociados a la industria pesada (Hardt et al., 2018).

Tabla 6 – Métricas estructurales por período para Reino Unido

Período	det(B)	det(HE)	Entropía B	Entropía HE	Δ entropía
1961–1966	-4,97e+33	3,57e+39	0,088	0,206	0,118
1967–1972	-2,18e+34	1,69e+40	0,102	0,235	0,133
1973–1978	2,23e+34	-1,98e+40	0,088	0,212	0,124
1979–1984	5,29e+34	-4,73e+39	0,113	0,219	0,106
1985–1990	-9,47e+34	-1,36e+40	0,090	0,217	0,127
1991–1996	8,39e+34	3,33e+39	0,115	0,169	0,053
1997–2002	-4,43e+34	-2,07e+39	0,094	0,182	0,088
2003–2008	3,22e+35	3,85e+39	0,138	0,154	0,016
2009–2014	-9,63e+34	2,12e+39	0,087	0,146	0,060
2014–2019	-1,69e+34	9,58e+38	0,098	0,153	0,055

Fuente: elaboración propia a partir de Global Footprint Network (2022) y O'Neill et al. (2018) .

El valor absoluto del determinante de B presenta variaciones de magnitud en ocho de los diez bloques (Figura 6), con una frecuencia tan alta como la de Alemania y Colombia; estas variaciones persistentes sugieren que la configuración de dependencia entre los vectores anuales de B se reorganiza repetidamente; en términos de sistemas dinámicos, los cambios en la magnitud del determinante y en la distribución de los valores singulares sugieren puntos de inflexión en los que la estructura de la oferta ecológica pasa de una configuración a otra cualitativamente distinta (Carbonell y Parra, 2024). La evolución de la entropía de B británica muestra un patrón ascendente: desde valores en torno a 0,088–0,102 en las primeras dos décadas hasta un máximo de 0,138 en 2003–2008, seguido de un descenso a 0,087 en 2009–2014 y una recuperación moderada a 0,098 en 2014–2019. El máximo de 2003–2008 coincide con el mínimo del balance entrópico, lo que sugiere que en ese bloque la B británica alcanzó su máxima diversificación estructural. La evolución de la entropía de HE sigue un patrón de descenso durante todo el período, especialmente pronunciado entre 1985–1990 (0,217) y 1991–1996 (0,169), un cambio de 0,048 unidades que coincide con el declive industrial y la transición hacia una economía de servicios (Hardt et al., 2018). Este patrón sugiere que la HE británica se ha concentrado progresivamente en menos componentes, principalmente el carbono, en la medida en que los componentes asociados a la industria pesada y a la agricultura intensiva pierden participación relativa

En términos históricos, la reducción de la actividad minera y manufacturera a partir de la década de 1980, junto con la privatización de industrias estatales y la desregulación financiera, transformó la matriz energética y los patrones de consumo del país: la huella de carbono, que en las primeras décadas representaba una fracción importante de la huella total junto con componentes asociados a la industria, pasó a dominar la estructura dimensional de HE tras la desindustrialización.

Canadá

Canadá presenta una reducción de los productos forestales y de las zonas de pesca, que constituyen los dos componentes dominantes de su B (Global Footprint Network, 2022). El caso canadiense presenta la segunda entropía de HE más alta de la muestra en el último período (0,286) y una de las entropías de B más bajas (0,073), lo que configura una asimetría dimensional de 0,213, la más alta de la muestra junto con Chile (0,212) (Tabla 7). Esta combinación de diversificación de la demanda con concentración de la oferta es característica de países con abundancia de recursos naturales específicos —en este caso,

productos forestales y pesqueros— cuyos patrones de consumo se han diversificado a lo largo del período.

Tabla 7 – Métricas estructurales por período para Canadá

Período	det(B)	det(HE)	Entropía B	Entropía HE	Δ entropía
1961–1966	6,94e+34	-6,54e+36	0,071	0,269	0,198
1967–1972	-1,04e+36	2,45e+40	0,061	0,389	0,328
1973–1978	-7,17e+37	9,93e+38	0,099	0,349	0,250
1979–1984	5,46e+36	6,34e+39	0,068	0,363	0,295
1985–1990	1,07e+37	4,83e+39	0,086	0,451	0,365
1991–1996	8,49e+34	-1,02e+39	0,037	0,350	0,313
1997–2002	2,62e+37	-1,62e+40	0,126	0,280	0,154
2003–2008	-4,25e+37	-1,85e+40	0,088	0,351	0,263
2009–2014	-1,36e+36	-2,18e+40	0,104	0,271	0,166
2014–2019	-4,84e+35	-4,22e+38	0,073	0,286	0,213

Fuente: elaboración propia a partir de Global Footprint Network (2022) y O'Neill et al. (2018) .

La evolución de la entropía de HE canadiense muestra un máximo marcado en 1985–1990 (0,451), el valor más alto de toda la muestra en cualquier bloque y cualquier país, coincidente con un período de expansión económica y aumento del consumo asociado a la recuperación posterior a las crisis del petróleo de la década de 1970. Tras ese máximo, la entropía de HE desciende progresivamente desde el período 1991–1996 hasta el sexenio de 2014–2019; el patrón oscilante refleja la alternancia entre períodos de mayor y menor diversificación de la demanda, posiblemente asociada a fluctuaciones en los precios de los recursos energéticos y a cambios en la composición del consumo. La entropía de B oscila entre 0,037 y 0,126, con un promedio de 0,081, el segundo más bajo de la muestra después de Japón. El mínimo de 0,037 en 1991–1996 coincide con el máximo de entropía de HE en el bloque inmediatamente anterior (1985–1990, con 0,451); esta coincidencia sugiere una relación inversa entre la diversidad de la oferta y la de la demanda en el tránsito entre esos dos bloques: cuando la HE alcanzó su máxima diversificación, la B alcanzó su máxima concentración.

El valor absoluto del determinante de B canadiense presenta variaciones de magnitud en seis de los diez bloques, con una frecuencia menor que la de los países europeos y latinoamericanos, lo que sugiere que la estructura de B canadiense es relativamente más estable que la de otros países, coherente con el dominio persistente de los componentes forestales y pesqueros. La magnitud del determinante varía en un rango amplio, desde –7,17e+37 (1973–1978) hasta 2,62e+37 (1997–2002), reflejando la sensibilidad de la estructura a las variaciones en la composición de los componentes dominantes. El balance

entrópico es positivo en todos los bloques y alcanza su máximo en 1985–1990 (0,365), coincidiendo con el máximo de entropía de HE. El valor del último período (0,213) es el más alto de la muestra junto con el de Chile (0,212): la HE canadiense es estructuralmente más diversificada que la B en una magnitud que casi duplica la del promedio de la muestra. En términos históricos, la explotación de recursos forestales y pesqueros constituye el proceso más relevante para interpretar la evolución de la B canadiense; la reducción documentada de productos forestales y zonas de pesca refleja la sobreexplotación de estos recursos y los cambios en las prácticas de gestión, pero la persistencia de una entropía de B baja a lo largo de todo el período sugiere que, a pesar de estas reducciones, la estructura de la oferta canadiense no se ha diversificado: sigue dominada por los mismos componentes, solo que en menor magnitud.

Estados Unidos

Estados Unidos presenta una reducción del componente forestal y un aumento sostenido de la huella de carbono, que se ha convertido en el componente dominante de su HE. La huella de carbono media es de aproximadamente 16 tCO_2e per cápita y año (US-EPA, 2022), y su HE en términos de carbono es de 8,04 hectáreas por persona (Bowyer et al., 2009). El caso estadounidense presenta una particularidad estructural: la magnitud del determinante de huella es la más alta de toda la muestra por varios órdenes de magnitud, con un valor de −1,70e+44 en 2014–2019, aproximadamente seis órdenes de magnitud superior al del siguiente país en magnitud de determinante de HE (Tabla 8).

Tabla 8 – Métricas estructurales por período para Estados Unidos

Período	det(B)	det(HE)	Entropía B	Entropía HE	Δ entropía
1961-1966	2,16e+39	5,20e+41	0,080	0,142	0,062
1967–1972	-1,58e+40	4,79e+42	0,101	0,184	0,083
1973–1978	6,24e+39	-6,00e+42	0,103	0,143	0,040
1979–1984	2,02e+41	-1,47e+44	0,121	0,263	0,142
1985–1990	5,97e+40	8,40e+43	0,105	0,180	0,076
1991–1996	2,48e+39	-7,36e+43	0,124	0,250	0,126
1997–2002	1,42e+39	2,07e+41	0,095	0,159	0,064
2003–2008	1,67e+40	-6,18e+42	0,065	0,136	0,071
2009–2014	-7,30e+39	-8,87e+41	0,091	0,106	0,015
2014–2019	2,02e+38	-1,70e+44	0,094	0,186	0,092

Fuente: elaboración propia a partir de Global Footprint Network (2022) y O'Neill et al. (2018)

Sin embargo, la entropía de HE estadounidense es relativamente baja: oscila entre 0,106 y 0,263, con un promedio de 0,176, por debajo del promedio de la muestra. Esta combinación de determinante grande con entropía relativamente baja indica que, aunque los vectores anuales son independientes entre sí, la distribución de los valores singulares está dominada por uno o dos de ellos (Legendre y Legendre, 2012): la matriz tiene alta independencia lineal pero baja diversidad estructural, pues los seis vectores difieren entre sí pero todos están dominados por el mismo componente principal, el carbono. El determinante de B estadounidense es positivo en ocho de los diez bloques, con una estabilidad de signo que solo comparte con Francia; esta estabilidad sugiere que la estructura de B estadounidense es relativamente consistente a lo largo del período, sin las reorganizaciones frecuentes que caracterizan a otros países. La magnitud del determinante varía en un rango amplio, desde 2,02e+38 (2014–2019) hasta 2,02e+41 (1979–1984), lo que refleja la sensibilidad de la estructura a las variaciones en la composición de los componentes.

La entropía de B estadounidense oscila entre 0,065 y 0,124; es una de las más bajas de la muestra, lo que indica que la oferta ecológica estadounidense está concentrada en pocos componentes. En términos de composición, los componentes dominantes son los productos forestales, las tierras de cultivo y los pastizales, con contribuciones menores de las zonas de pesca y del suelo urbanizado. El balance entrópico es positivo en todos los bloques, con un mínimo de 0,015 en 2009–2014 y un máximo de 0,142 en 1979–1984. El valor del último período (0,092) es intermedio en la muestra, similar al de Japón (0,085) y superior al de Alemania (0,030). La coincidencia del mínimo del balance (0,015 en 2009–2014) con el mínimo de entropía de HE (0,106) sugiere que, en ese bloque, la HE estadounidense alcanzó su máxima concentración estructural, probablemente asociada a la crisis financiera de 2008–2009 y a la reducción temporal del consumo.

Japón

Japón presenta el déficit de B más pronunciado entre los nueve países analizados. Según datos de Global Footprint Network, su HE es de 4,6 gha per cápita (2018) y su B de solo 0,6 gha per cápita, con un déficit de B del 672 % (Earth Overshoot Day, 2021; Global Footprint Network, 2019). El caso japonés representa la concentración estructural extrema en ambos sistemas: la entropía de B es la más baja de

toda la muestra (0,022–0,091, con un promedio de 0,054), lo que indica que la oferta está dominada por un número muy limitado de componentes (Tabla 9).

Tabla 9 – Métricas estructurales por período para Japón

Período	det(B)	det(HE)	Entropía B	Entropía HE	Δ entropía
1961–1966	5,87e+32	4,16e+40	0,071	0,315	0,244
1967–1972	9,07e+34	-1,48e+40	0,087	0,326	0,239
1973–1978	1,67e+32	3,81e+41	0,069	0,215	0,146
1979–1984	-9,81e+31	-7,74e+40	0,075	0,230	0,155
1985–1990	-1,76e+32	-6,33e+40	0,030	0,155	0,125
1991–1996	3,67e+34	2,70e+40	0,091	0,154	0,063
1997–2002	-5,03e+32	-7,30e+40	0,033	0,172	0,139
2003–2008	-1,58e+32	3,74e+38	0,023	0,088	0,064
2009–2014	2,75e+31	-1,69e+39	0,022	0,113	0,090
2014–2019	-3,34e+33	-8,37e+39	0,034	0,119	0,085

Fuente: elaboración propia a partir de Global Footprint Network (2022) y O'Neill et al. (2018) .

La entropía de HE japonesa desciende desde 0,326 en 1967–1972 hasta 0,088 en 2003–2008, reflejando la creciente dominancia del carbono en la HE total, asociada a la dependencia de combustibles fósiles importados y a la reducción relativa de los componentes asociados a la producción doméstica; posteriormente se recupera ligeramente hasta 0,113 en 2009–2014 y 0,119 en 2014–2019. El determinante de B alterna de signo en seis de los diez bloques con magnitudes que reflejan la sensibilidad de la estructura a las variaciones en la composición de los componentes dominantes. En los bloques finales, la convergencia dimensional entre ambos sistemas refleja una coincidencia de componentes dominantes, no una diversificación equilibrada.

La transformación económica japonesa desde la posguerra hasta la década de 1990 constituye el proceso más relevante para interpretar la evolución de las métricas estructurales: el crecimiento económico acelerado de las décadas de 1960 y 1970, seguido por la burbuja financiera y la subsiguiente "década perdida", transformaron la composición de la HE japonesa. La reducción de la entropía de HE desde 0,326 (1967–1972) hasta 0,088 (2003–2008) refleja la creciente dominancia del carbono en la HE total. El caso japonés permite ilustrar un fenómeno que no aparece con la misma claridad en los otros países: la dependencia estructural de la importación de recursos. Con una B doméstica extremadamente limitada y una HE que triplica esa B en términos de magnitud, Japón depende críticamente de la importación de recursos para satisfacer su demanda. La concentración estructural de ambos sistemas sugiere que esta

dependencia no se ha diversificado a lo largo del período, sino que se ha mantenido concentrada en un número limitado de componentes.

DISCUSIÓN

El análisis conjunto de los nueve países a lo largo de los diez bloques sexenales permite identificar patrones estructurales que trascienden las particularidades nacionales.

Universalidad de la asimetría dimensional El resultado más robusto del análisis es que la entropía de HE supera a la de B en los noventa bloques analizados (nueve países × diez períodos), sin una sola excepción. Esta universalidad indica que la asimetría dimensional entre oferta y demanda constituye una propiedad estructural del sistema socioecológico, no un fenómeno contingente de países o períodos específicos. En términos interpretativos, esto sugiere que la diversificación de la demanda —asociada a la multiplicidad de usos del suelo, a la matriz energética y a los patrones de consumo— ha superado sistemáticamente la diversificación de la oferta ecológica, que permanece concentrada en un número limitado de componentes productivos. La persistencia de esta asimetría a lo largo de seis décadas indica que no se trata de un fenómeno transitorio que se resuelva espontáneamente con el desarrollo económico. Alemania y el Reino Unido, que han atravesado procesos profundos de desindustrialización y transición energética, mantienen balances entrópicos positivos en todos los bloques, aunque con valores decrecientes. Francia, que presenta la B más diversificada de la muestra en el último período, tampoco ha logrado revertir el signo del balance. La asimetría dimensional aparece, por tanto, como una característica estructural de la relación entre tecnosfera y biosfera en los países analizados.

Tres trayectorias temporales diferenciadas La evolución del balance entrópico a lo largo del período permite distinguir tres trayectorias temporales. *La primera es la convergencia sostenida***,** que caracteriza a Alemania y al Reino Unido. En ambos países, el balance entrópico desciende de forma monotónica desde los primeros bloques hasta los últimos, con una reducción acumulada de 0,309 y 0,063 unidades respectivamente. La convergencia se produce por una combinación de diversificación de B (especialmente en Alemania, cuya entropía B aumenta desde 0,045 hasta 0,128) y concentración de HE (especialmente en el Reino Unido, cuya entropía HE desciende desde 0,235 hasta 0,153). Esta trayectoria es consistente con procesos de reestructuración económica profunda: desindustrialización, transición hacia economías de servicios y descarbonización parcial de la matriz energética (Hardt et al.,

2018; Krausmann et al., 2018). *La segunda es la divergencia persistente,* que caracteriza a Chile, Colombia y Canadá. En estos países, el balance entrópico se mantiene elevado en todos los bloques, con valores promedio de 0,345, 0,145 y 0,255 respectivamente. La divergencia se produce por la combinación de una HE relativamente diversificada con una B concentrada en recursos forestales y pesqueros. Esta trayectoria es consistente con economías basadas en la explotación de recursos naturales, cuya oferta ecológica no se diversifica a pesar de las transformaciones en la demanda (Schaffartzik et al., 2014). *La tercera es la convergencia por empobrecimiento,* que caracteriza a México. En este país, el balance entrópico desciende desde 0,248 (1997–2002) hasta 0,012 (2014–2019), pero la convergencia no se produce por diversificación de la oferta ni por mejora estructural, sino por concentración simultánea de ambos sistemas. La entropía de HE mexicana desciende desde 0,347 hasta 0,112, mientras la entropía de B se mantiene en un rango bajo. El resultado es una configuración en la que ambos sistemas están igualmente concentrados, pero en la parte baja del espectro de diversidad. Esta trayectoria es consistente con procesos de degradación de B, documentados por la pérdida de superficie forestal y selvática (Koleff et al., 2009; Graesser et al., 2015), y de intensificación de la huella de carbono.

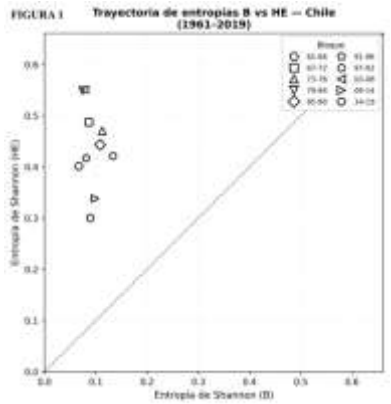
Francia, Estados Unidos y Japón ocupan posiciones intermedias o atípicas. Francia combina una convergencia moderada con una diversificación reciente de B, única en la muestra. Estados Unidos y Japón presentan balances entrópicos oscilantes sin tendencia clara, pero con entropías de huella bajas que reflejan el dominio del carbono en ambos casos.

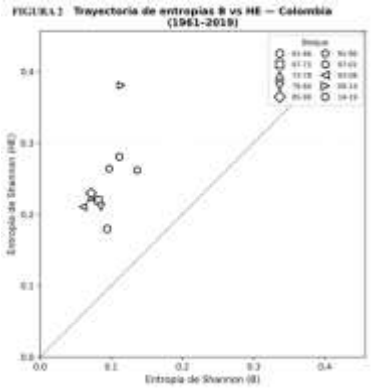
Cuatro fases históricas del período 1961–2019 El análisis transversal de los diez bloques permite identificar cuatro fases temporales que afectan de manera diferenciada a los países. Esta periodización no es una interpretación arbitraria, sino que se alinea con hitos ampliamente reconocidos en la literatura sobre metabolismo socioeconómico e historia ambiental. *Fase de expansión y diversificación (1961–1972).* Los primeros bloques se caracterizan por entropías de HE moderadas o altas en la mayoría de los países (promedio de 0,244) y un aumento simultáneo de las magnitudes de B y HE. Esta fase coincide con el período de máximo crecimiento económico y de uso de recursos posterior a la Segunda Guerra Mundial, documentado en la literatura como la "Gran Aceleración" (Steffen et al., 2015; McNeill y Engelke, 2014). Durante este período, la HE aún no estaba dominada por el carbono de forma tan

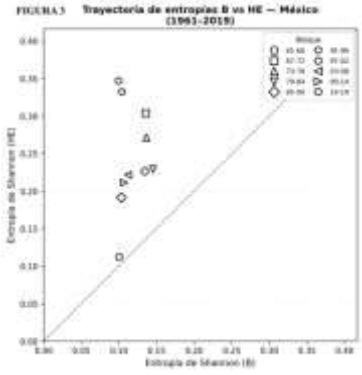
significativa como en décadas posteriores, lo que se refleja en valores de entropía relativamente altos en países como Chile (0,401–0,487), Canadá (0,269–0,389) y Japón (0,315–0,326). El análisis del metabolismo social confirma que el uso global de materiales se multiplicó por ocho entre 1900 y 2005, con la aceleración más pronunciada entre 1950 y 1970 (Krausmann et al., 2009). *Fase de reconfiguración por crisis energéticas (1973–1984).* Las crisis del petróleo de 1973 y 1979 introdujeron perturbaciones significativas en los patrones de consumo energético. En varios países se observan variaciones significativas en la magnitud del determinante de HE (Alemania, Estados Unidos, Reino Unido, Canadá), lo que indica reorganizaciones estructurales profundas. La entropía de HE alcanza sus valores máximos en Chile (0,549) y Canadá (0,363), mientras que en Alemania y el Reino Unido comienza un descenso sostenido. Esta fase marca el inicio de la divergencia entre países industrializados, que comienzan a reducir su entropía de HE, y países exportadores de recursos, que la mantienen o la aumentan. La literatura sobre el "síndrome de la década de 1970" ha documentado rupturas estructurales en el metabolismo de las economías industriales a partir de 1973, con un cambio de régimen en el consumo per cápita de energía y materiales (Wiedenhofer et al., 2013; Krausmann et al., 2008; Fischer-Kowalski et al., 2011). *Fase de globalización y desindustrialización (1985–2002).* La entropía de HE se estabiliza o desciende en la mayoría de los países europeos, mientras se mantiene alta en América Latina y Canadá. La magnitud de la huella crece de forma sostenida en todos los países, pero la de B comienza a estancarse en algunos casos. México registra su máximo de entropía de huella (0,347 en 1997–2002) y su máximo balance entrópico (0,248), antes de la convergencia posterior. Esta fase coincide con la aceleración de la globalización y el aumento del comercio internacional de recursos. Schaffartzik et al. (2014) documentan el aumento de las importaciones físicas en Europa, Estados Unidos y Japón a partir de la década de 1990, así como el desplazamiento de la extracción de recursos hacia América Latina, África y Asia. En cuanto a la desindustrialización, Hardt et al. (2018) demuestran que la reducción del consumo energético industrial en el Reino Unido entre 1990 y 2015 se debió principalmente a la reasignación sectorial —cierre de industrias intensivas en energía— y no a mejoras de eficiencia, lo que es consistente con la interpretación de la convergencia dimensional británica como resultado de la desindustrialización.

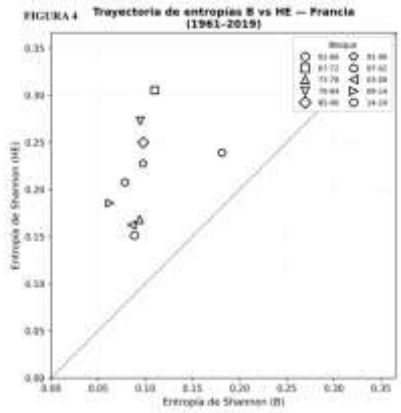
Fase de concentración y convergencia parcial (2003–2019). Los últimos bloques muestran dos tendencias contrapuestas. Por un lado, Alemania, el Reino Unido y Francia reducen su balance entrópico hasta valores mínimos (0,030, 0,055 y 0,058), indicando una convergencia entre la diversidad de HE y la de B. Por otro lado, Chile, Canadá y Colombia mantienen balances entrópicos altos (0,212, 0,213 y 0,170), reflejando una asimetría estructural persistente. México alcanza el balance más bajo de la muestra (0,012). Esta fase coincide con la intensificación de las políticas de descarbonización en Europa y con el aumento de la deforestación en América Latina. En el caso europeo, Krausmann et al. (2018) documentan la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en Alemania asociada a la transición energética (*Energiewende*) y al aumento de las energías renovables en el mix eléctrico. En el caso latinoamericano, Graesser et al. (2015) analizan la dinámica de la deforestación entre 2000 y 2013 y documentan la reaceleración del proceso en la primera década del siglo XXI, tras un período de desaceleración en los años noventa. Los informes de la FAO (2020) confirman esta tendencia a escala regional y global.

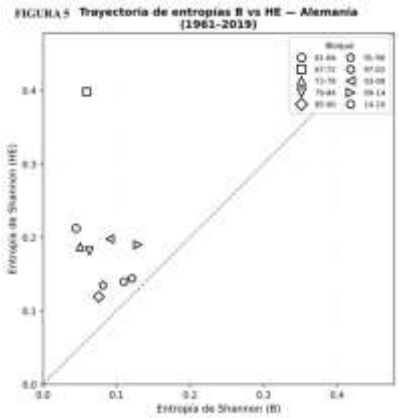
Representación visual de las trayectorias Las figuras de dispersión (Figuras 1 a 9) representan la trayectoria de cada país en el plano de entropías (Entropía B vs. Entropía HE). La comparación entre las figuras de Chile y Francia ilustra dos trayectorias opuestas. En Chile, la trayectoria se inicia en la parte superior izquierda (alta entropía HE, baja entropía B) y desciende progresivamente, reflejando la concentración de la huella en el componente de carbono. En Francia, la trayectoria muestra un desplazamiento hacia la derecha (aumento de la entropía B desde 0,088 hasta 0,181) con oscilaciones verticales moderadas, reflejando una diversificación de la oferta ecológica sin una concentración equivalente de la demanda. Estas dos direcciones ilustran que la relación entre tecnosfera y biosfera no evoluciona de manera uniforme, sino que responde a procesos históricos específicos (Krausmann et al., 2018).

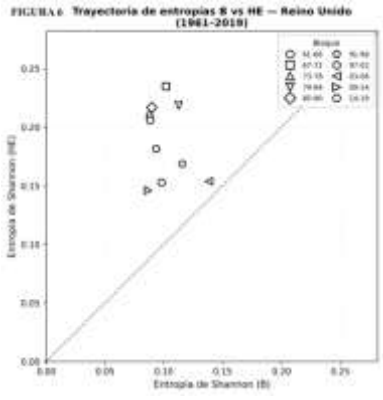


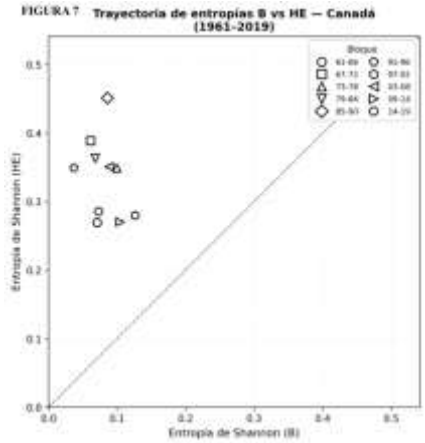


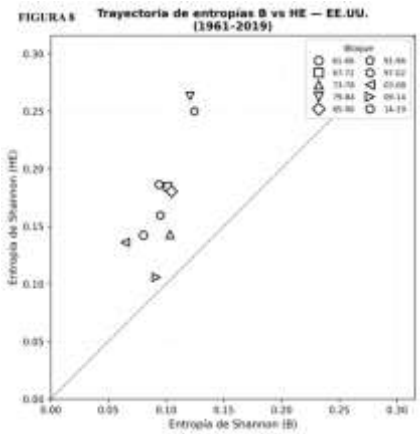


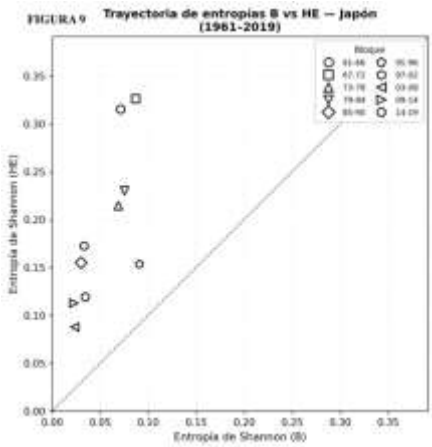








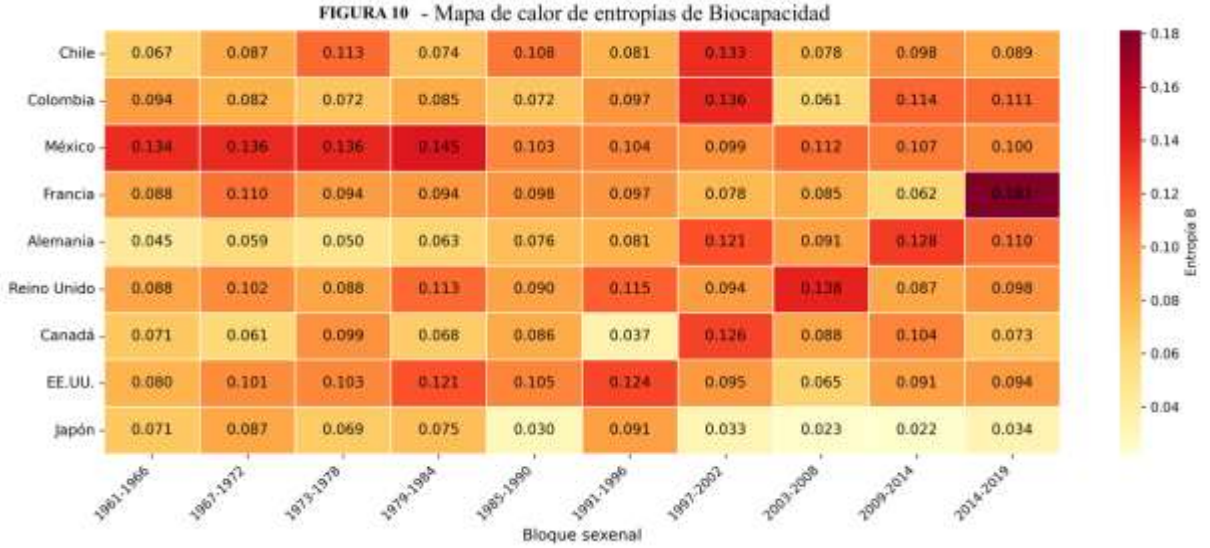




Las figuras de dispersión (Figura 1 a 9) también permiten visualizar la dispersión temporal de cada país. Canadá y Chile presentan la mayor dispersión vertical (la entropía HE varía entre 0,269 y 0,451 en Canadá, y entre 0,301 y 0,551 en Chile), mientras que Japón y México presentan la menor (la entropía HE varía entre 0,088 y 0,326 en Japón, y entre 0,112 y 0,347 en México).

Esta diferencia sugiere que los países con entropías más altas presentan mayor variabilidad estructural, mientras que los países con entropías más bajas presentan estructuras más estables pero más concentradas. Los mapas de calor de entropías de HE (Figura 10) y de B (Figura 11) presentan matrices de nueve países × diez bloques, donde la intensidad del color representa el valor de la entropía. La representación conjunta de ambos sistemas permite identificar patrones temporales y estructurales que no son evidentes en las tablas numéricas.

FIGURA 10 - Mapa de calor de entropías de Biocapacidad

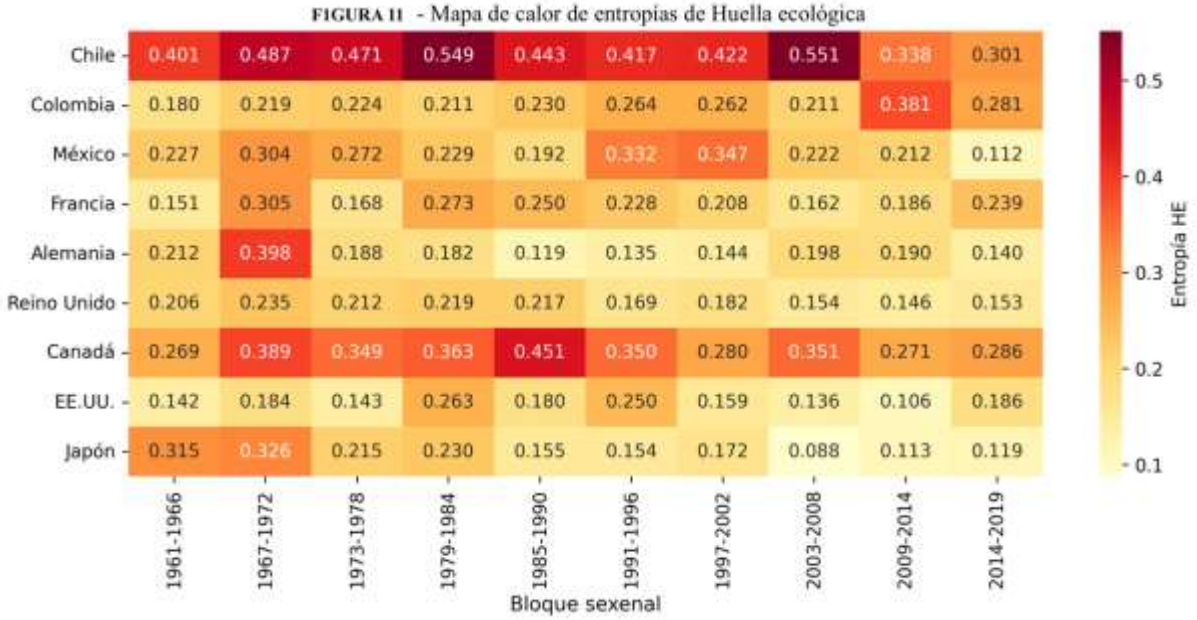


El mapa de calor de HE muestra tres patrones. Primero, la diagonal de valores máximos se concentra en los bloques intermedios (1973–1984 y 2009–2014), lo que sugiere que la diversidad estructural de la huella alcanzó sus valores máximos en períodos de reconfiguración económica: las crisis del petróleo en el primer caso y la crisis financiera en el segundo. Segundo, los países latinoamericanos y Canadá presentan valores consistentemente altos a lo largo de todo el período, mientras que los países europeos y Japón muestran valores decrecientes. Tercero, la reducción de la dispersión entre países en el último período (de un rango de 0,463 en los primeros bloques a 0,189 en el último) sugiere una convergencia estructural que no había sido documentada en la literatura previa (Cao et al., 2017).

El mapa de calor de B presenta un patrón marcadamente distinto. Los valores oscilan entre 0,022 (Japón, 2009–2014) y 0,181 (Francia, 2014–2019), un rango de 0,159 unidades que es menos de la mitad del rango observado en la huella (0,088–0,551, rango de 0,463). Esta diferencia en la amplitud del rango constituye el primer hallazgo que emerge de la comparación visual de ambos mapas: la B es estructuralmente más homogénea entre países y a lo largo del tiempo que la HE. Tres patrones

específicos emergen del mapa de B. Primero, Japón presenta la concentración estructural más extrema de la muestra: sus valores oscilan entre 0,022 (2009–2014) y 0,091 (1991–1996), con seis de los diez bloques por debajo de 0,075. Segundo, México presenta los valores más altos en los primeros cuatro bloques (0,134–0,145), seguidos de un descenso progresivo hasta 0,100 en 2014–2019. Tercero, Francia presenta la evolución más dinámica del período: valores intermedios y estables en los primeros siete bloques, un mínimo de 0,062 en 2009–2014 y un máximo de 0,181 en 2014–2019.

FIGURA II - Mapa de calor de entropías de Huella ecológica



Implicaciones teóricas Los patrones identificados permiten establecer tres conexiones con el marco teórico del artículo. *Primero, la universalidad de la asimetría dimensional* respalda la tesis de Georgescu-Roegen (1971) sobre los límites biofísicos del crecimiento económico. La entropía estructural de la huella, consistentemente superior a la de B, sugiere que la tecnosfera ha desarrollado una complejidad dimensional que la biosfera no puede igualar en términos de oferta. Esta asimetría no se resuelve con el desarrollo económico, sino que persiste en todos los niveles de ingreso, aunque con magnitudes variables. *Segundo, la diferenciación de trayectorias temporales* sugiere que la relación entre tecnosfera y biosfera no evoluciona de manera uniforme, sino que responde a procesos históricos específicos. La convergencia europea, la divergencia latinoamericana y la convergencia por empobrecimiento mexicana representan tres configuraciones distintas de la misma tensión estructural entre oferta y demanda. *Tercero, la identificación de fases temporales* sugiere que los cambios en la

estructura dimensional del sistema no son graduales, sino que se concentran en períodos de reconfiguración asociados a crisis energéticas, transformaciones económicas y políticas ambientales.

CONCLUSIONES

Este artículo ha aplicado la metodología de entropía estructural basada en matrices 6×6 a nueve países de la OCDE durante el período 1961–2019. El análisis de los determinantes, las entropías de Shannon y el balance entrópico en diez bloques sexenales permite establecer las siguientes conclusiones.

La asimetría dimensional entre HE y B es universal y persistente. En los noventa bloques analizados (nueve países × diez períodos temporales), sin excepción, la entropía de HE supera a la entropía de B. Esta universalidad indica que la asimetría dimensional no es un fenómeno circunscrito a ciertos países o períodos específicos, sino una propiedad estructural de la relación entre tecnosfera y biosfera en las economías analizadas. La persistencia de esta asimetría en países que han atravesado procesos de desindustrialización y transición energética (Alemania, Reino Unido) sugiere que no se resuelve con el desarrollo económico. Esto respalda la tesis de Georgescu-Roegen (1971) sobre los límites biofísicos del crecimiento económico y la irreversibilidad de la degradación entrópica.

La evolución de la entropía estructural responde a tres trayectorias diferenciadas. El análisis longitudinal permite distinguir tres perfiles. La convergencia sostenida, que caracteriza a Alemania y al Reino Unido, se produce por una combinación de diversificación de B y concentración de HE, asociada a procesos de desindustrialización y descarbonización. La divergencia persistente, que caracteriza a Chile, Colombia y Canadá, se produce por la combinación de una HE diversificada con una B concentrada en recursos forestales y pesqueros. La convergencia por empobrecimiento, que caracteriza a México, se produce por concentración simultánea de ambos sistemas en pocos componentes, reflejando degradación de la oferta y concentración de la demanda. Estos tres perfiles no coinciden con la magnitud de las trazas ni con el nivel de desarrollo económico, lo que confirma la independencia entre diversidad estructural y magnitud del sistema.

El análisis del período 1961–2019 revela cuatro fases diferenciadas. La fase de expansión y diversificación (1961–1972) coincide con la "Gran Aceleración" (Steffen et al., 2015; McNeill y Engelke, 2014). La fase de reconfiguración por crisis energéticas (1973–1984) asociada con las rupturas estructurales documentadas para el llamado "síndrome de la década de 1970" (Wiedenhofer et al., 2013;

Krausmann et al., 2008). La fase de globalización y desindustrialización (1985–2002) coincide con el aumento de las importaciones físicas en los países industrializados y el desplazamiento de la extracción de recursos hacia América Latina (Schaffartzik et al., 2014; Hardt et al., 2018). La fase de concentración y convergencia parcial (2003–2019) refleja dos tendencias contrapuestas: la intensificación de la descarbonización en Europa (Krausmann et al., 2018) y la reaceleración de la deforestación en América Latina (Graesser et al., 2015; FAO, 2020). Esta periodización sugiere que los cambios en la estructura dimensional del sistema no son graduales, sino que se concentran en períodos de reconfiguración asociados a crisis energéticas, transformaciones económicas y políticas ambientales.

La diversidad estructural y la magnitud del sistema son dimensiones independientes. La comparación entre países con trazas similares pero entropías distintas (Estados Unidos y Canadá, por un lado; Chile y Colombia, por otro) demuestra que un sistema puede tener una magnitud elevada y una estructura concentrada, o una magnitud moderada y una estructura diversificada. Esta distinción es relevante porque los indicadores convencionales de B y HE solo capturan la magnitud, no la diversidad. La metodología propuesta permite distinguir entre ambas dimensiones y, con ello, identificar configuraciones de vulnerabilidad estructural que pasan desapercibidas en los análisis basados exclusivamente en sumas anuales.

El balance entrópico bajo no es indicador de sostenibilidad. La convergencia dimensional observada en México (Δ = 0,012), Alemania (Δ = 0,030) y el Reino Unido (Δ = 0,055) no refleja una mejora estructural uniforme. En México, la convergencia se produce por empobrecimiento simultáneo de ambos sistemas; en Alemania y el Reino Unido, por reducción de la diversidad de la HE asociada a procesos de descarbonización y desindustrialización. La interpretación del balance entrópico requiere, por tanto, el análisis conjunto de las entropías individuales de cada sistema y de los determinantes, sin que ninguna métrica pueda interpretarse de forma aislada.

El análisis abre líneas de trabajo futuro. La aplicación de ventanas móviles desplazándose año a año permitiría obtener series continuas de determinantes y entropías, facilitando la identificación de puntos de inflexión con mayor precisión. La incorporación de columnas normativas para otros límites planetarios (nitrógeno, fósforo, agua dulce, uso del suelo) permitiría evaluar si la asimetría dimensional se mantiene o se modifica al ampliar el número de componentes. La exploración de correlaciones entre

las métricas entrópicas y variables económicas permitiría identificar qué factores económicos se asocian con una mayor o menor diversidad estructural. La ampliación del análisis a países no OCDE permitiría evaluar si los perfiles estructurales identificados se reproducen en contextos económicos y ecológicos distintos. La incorporación de data de comercio internacional permitiría distinguir entre la huella doméstica y la huella externalizada, y evaluar si la asimetría dimensional se debe a la estructura productiva interna o a la dependencia de importaciones.

En síntesis, la metodología propuesta no invalida el trabajo de Wackernagel y Rees, sino que lo complementa. Mientras que la suma anual responde a la pregunta de cuánto consumimos por cada componente, el enfoque matricial responde a cómo cambia la estructura de ese consumo a lo largo del tiempo y a si el sistema se está empobreciendo o diversificando dimensionalmente. En el contexto actual, donde los límites planetarios se ven cada vez más presionados por la expansión material de la tecnosfera, disponer de herramientas analíticas que capturen la complejidad y la evolución de los sistemas socioecológicos resulta esencial para orientar las políticas de sostenibilidad y la transición hacia modelos económicos compatibles con la finitud biofísica del planeta.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alzate Rodriguez, L. V. (2022). *Análisis de la deforestación en Colombia desde la Curva Ambiental de Kuznets* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia].

Bahamondez V., C., Sagardia Parga, R., & Rose, J. (2020). *El bosque nativo en Chile: Resultados del inventario forestal nacional período 2001–2015*. INFOR. https://doi.org/10.52904/20.500.12220/30450

BCN, Cámara de Diputados de Chile. (1994). *Sesión Ordinaria N° 28 celebrada el 12 de enero de 1994, Legislatura Extraordinaria número 327*.

Borucke, M., Moore, D., Cranston, G., Gracey, K., Iha, K., Larson, J., Lazarus, E., Morales, J. C., Wackernagel, M., & Galli, A. (2013). Accounting for demand and supply of the biosphere's regenerative capacity: The National Footprint Accounts' underlying methodology and framework. *Ecological Indicators*, *24*, 518–533. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.08.005

Bowyer, J., Fernholz, K., Howe, J., & Bratkovich, S. (2009). *Comparing the ecological footprint of the US and the EU*. Dovetail Partners.

Cao, Y., Chen, C., & Ge, X. (2017). Trends in per capita ecological footprint and biocapacity in China 1949–2013. *Chinese Journal of Population, Resources and Environment*, *15*(2), 175–181. https://doi.org/10.1080/10042857.2016.1241579

Carbonell, E., & Parra, I. (2024). *Teoría de la evolución social humana: Epigénesis y tecnología para la supervivencia eficiente de la humanidad*. Editorial Almuzara.

Donoso, C., & Lara, A. (1996). *Utilización de los bosques nativos en Chile: Pasado, presente y futuro*. Universidad Austral de Chile / CIPMA.

Earth Overshoot Day. (2021). *How many Earths? How many countries?* https://overshoot.footprintnetwork.org

En Plan Planeta. (2025). *Capítulo 2–7*.

FAO. (2020). *Global Forest Resources Assessment 2020: Main report*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Fischer-Kowalski, M., Krausmann, F., Giljum, S., Lutter, S., Mayer, A., Bringezu, S., Moriguchi, Y., Schütz, H., Schandl, H., & Weisz, H. (2011). Methodology and indicators of economy-wide material flow accounting. *Journal of Industrial Ecology*, *15*(6), 855–876. https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00366.x

Georgescu-Roegen, N. (1971). *The entropy law and the economic process*. Harvard University Press.

Global Footprint Network. (2019). *Japan: Two decades of ecological footprinting*.

Global Footprint Network. (2022). *National Footprint and Biocapacity Accounts 2022 edition*. York University, Footprint Data Foundation & Global Footprint Network.

Graesser, J., Aide, T. M., Grau, H. R., & Ramankutty, N. (2015). Cropland/pastureland dynamics and the slowdown of deforestation in Latin America. *Environmental Research Letters*, *10*(3), 034017. https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/3/034017

Hardt, L., Owen, A., Brockway, P., Heun, M. K., Barrett, J., Taylor, P. G., & Foxon, T. J. (2018). Untangling the drivers of energy reduction in the UK productive sectors: Efficiency or offshoring? *Applied Energy*, *223*, 124–133. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.126

Koleff, P., Tambutti, M., March, I. J., Esquivel, R., Cantú, C., Lira-Noriega, A., & Urquiza-Haas, T. (2009). Identificación de prioridades y análisis de vacíos y omisiones en la conservación de

Biodiversidad de México. Capítulo en *Capital natural de México* (Vol. 2, pp. 651–718). CONABIO.

Krausmann, F., Fischer-Kowalski, M., Schandl, H., & Eisenmenger, N. (2008). The global sociometabolic transition: Past and present metabolic profiles and their future trajectories. *Journal of Industrial Ecology*, *12* (5–6), 637–656. https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2008.00065.x

Krausmann, F., Gingrich, S., Eisenmenger, N., Erb, K. H., Haberl, H., & Fischer-Kowalski, M. (2009). Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century. *Ecological Economics*, *68*(10), 2696–2705. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.05.007

Krausmann, F., Lauk, C., Haas, W., & Wiedenhofer, D. (2018). From resource extraction to outflows of wastes and emissions: The socioeconomic metabolism of the global economy, 1900–2015. *Global Environmental Change*, *52*, 131–140. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.07.003

Legendre, P., & Legendre, L. (2012). *Numerical ecology* (3rd English ed.). Elsevier.

Martino, D. (2007). Deforestación en la Amazonía: Principales factores de presión y perspectivas. *Revista del Sur*, *169*(1), 3–20.

McNeill, J. R., & Engelke, P. (2014). *The Great Acceleration: An environmental history of the Anthropocene since 1945*. Harvard University Press.

Muñoz del Campo, L., & Parra Vergara, I. (2026). Crecimiento a crédito: La deuda ecológica como motor económico. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, *10* (3), 3988–4013. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i3.24439

O'Neill, D. W., Fanning, A. L., Lamb, W. F., & Steinberger, J. K. (2018). A good life for all within planetary boundaries. *Nature Sustainability*, *1*(2), 88–95. https://doi.org/10.1038/s41893-018-0021-4

País Circular. (2021). *Se adelanta el sobregiro ecológico en Chile*.

Schaffartzik, A., Mayer, A., Gingrich, S., Eisenmenger, N., Loy, C., & Krausmann, F. (2014). The global metabolic transition: Regional patterns and trends of global material flows, 1950–2010. *Global Environmental Change*, *26*, 87–97.

https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.03.013

Steffen, W., Broadgate, W., Deutsch, L., Gaffney, O., & Ludwig, C. (2015). The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration. *The Anthropocene Review*, *2*(1), 81–98. https://doi.org/10.1177/2053019614564785

UK Department for Business, Energy and Industrial Strategy. (2021). *2019 UK greenhouse gas emissions, final figures*. https://www.gov.uk/government/statistics/final-uk-greenhouse-gas-emissions-national-statistics-1990-to-2019

United States Environmental Protection Agency. (2022). *Inventory of US greenhouse gas emissions and sinks: 1990–2022*.

Victoria-Hernández, A., Niño-Alcocer, M., Rodríguez-Avalos, J. A., & Argumedo-Espinoza, J. A. (2011, agosto). Generación de información de uso de suelo y vegetación proyectos y convenios escala 1:50000. En INEGI, *XIII Conferencia Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica*.

Wiedenhofer, D., Rovenskaya, E., Haas, W., Krausmann, F., Pallua, I., & Fischer-Kowalski, M. (2013). Is there a 1970s syndrome? Analyzing structural breaks in the metabolism of industrial economies. *Energy Procedia*, *40*, 182–191. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.08.022

World Bank. (2021). *World Bank Open Data*. https://datos.bancomundial.org