

Los Límites Seguros y Justos del Sistema Tierra

Johan Rockström et al¹

Síntesis

La estabilidad y la resiliencia del sistema Tierra y el bienestar humano están inseparablemente unidos^{1,2,3}, pero sus interdependencias no suelen reconocerse suficientemente, por lo que a menudo se tratan de forma independiente^{4,5}. En este trabajo utilizamos la modelización y la evaluación bibliográfica para cuantificar los límites seguros y justos del sistema Tierra (LST) para el clima, la biosfera, los ciclos del agua y los nutrientes, y los aerosoles a escala global y subglobal. Proponemos los LST para mantener la resiliencia y estabilidad del sistema terrestre (límites seguros) y minimizar la exposición de los seres humanos a daños significativos derivados del cambio

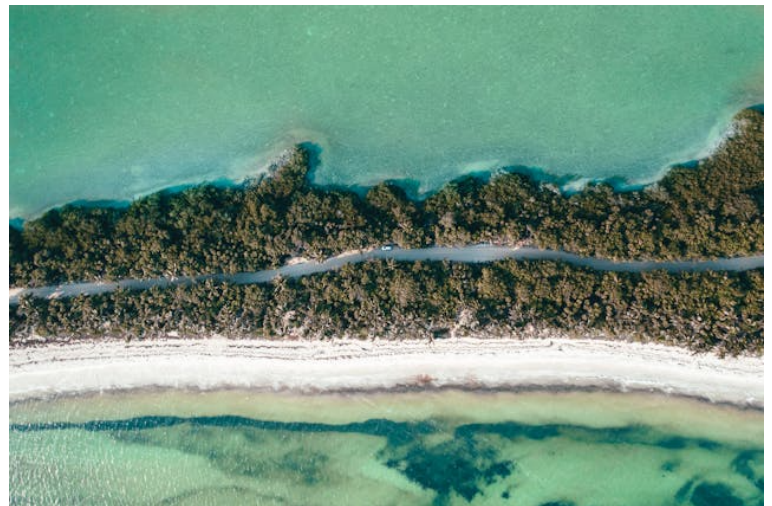


Photo by [Mikhail Nilov](#), Pexels.

Ya se han superado siete de las ocho LST.

del sistema terrestre (condición necesaria pero no suficiente para la justicia)⁴. El más estricto de los límites seguros o justos establece el límite integrado seguro y justo. Nuestros resultados muestran que las consideraciones de justicia limitan los LST integrados más que las consideraciones de seguridad para el clima y la carga de aerosoles atmosféricos. Ya se han superado siete de las ocho LST seguros y justos cuantificadas a escala mundial y al menos dos LST regionales seguros y justos en más de la mitad de la superficie terrestre mundial. Proponemos que nuestra evaluación proporcione una base cuantitativa para salvaguardar los bienes comunes globales para todas las personas ahora y en el futuro.

Inicio

La humanidad se encuentra bien adentrada en el Antropoceno⁶, la nueva época geológica propuesta en la que las presiones humanas han puesto al sistema Tierra en una trayectoria que se aleja rápidamente del estado estable del Holoceno de los últimos 12.000 años, que es el único estado del sistema Tierra del que tenemos pruebas de que puede sustentar el mundo tal y como lo conocemos^{7,8}. Estos rápidos cambios en el sistema Tierra socavan los sistemas críticos

¹ Ver todos los autores y sus contribuciones y afiliaciones al final del artículo.

que sustentan la vida^{1,9,10}, con importantes repercusiones sociales que ya se dejan sentir^{1,3}, y podrían desencadenar puntos de inflexión que desestabilicen irreversiblemente el sistema Tierra^{7,11,12}. Estos cambios están impulsados principalmente por sistemas sociales y económicos basados en la extracción y el consumo insostenibles de recursos. Las contribuciones al cambio del Sistema Tierra y las consecuencias de sus impactos varían enormemente entre grupos sociales y países. Dadas estas interdependencias entre el desarrollo humano inclusivo y un sistema Tierra estable y resiliente^{1,2,3,13}, se requiere una evaluación de límites seguros y justos que tenga en cuenta la resiliencia del sistema Tierra y el bienestar humano en un marco integrado^{4,5}.

Proponemos un conjunto de límites seguros y justos del Sistema Tierra (LST) para el clima, la biosfera, el agua dulce, los nutrientes y la contaminación atmosférica a escala global y subglobal. Estos ámbitos se eligieron por las siguientes razones. Abarcan los principales componentes del sistema Tierra (atmósfera, hidrosfera, geosfera, biosfera y criosfera) y sus procesos interrelacionados (ciclos del carbono, del agua y de los nutrientes), los "bienes comunes globales"¹⁴ que sustentan los sistemas de apoyo a la vida del planeta y, por tanto, el bienestar humano en la Tierra; tienen impactos en escalas de tiempo relevantes para las políticas; están amenazados por las actividades humanas; y podrían afectar a la estabilidad del sistema Tierra y al desarrollo futuro a escala global. Los LST que proponemos se basan en los conocimientos existentes, en la opinión de los expertos y en normas ampliamente compartidas, como la Agenda 2030. Pretenden ser una propuesta transparente para su posterior debate y perfeccionamiento por parte de los académicos y la sociedad en general.

En primer lugar, identificamos los límites "seguros" a escala subglobal y global para "mantener y aumentar la estabilidad y resiliencia del sistema Tierra a lo largo del tiempo, salvaguardando así sus funciones y su capacidad para sostener a los seres humanos y a todos los demás organismos vivos"⁴. Para determinar los límites seguros, utilizamos evaluaciones de riesgos de puntos de inflexión entre elementos de inflexión locales y regionales, pruebas sobre el declive de las funciones del sistema Tierra, análisis de la variabilidad histórica y la opinión de expertos. Evaluamos la incertidumbre y la confianza en estos LST. Los elementos de inflexión son aquellos componentes o procesos que regulan el funcionamiento y el estado del planeta y que muestran evidencias de tener umbrales en los que pequeñas perturbaciones adicionales pueden desencadenar cambios autorreforzantes que minan la resiliencia del sistema Tierra^{15,16}. Sin embargo, no nos basamos exclusivamente en los puntos de inflexión para establecer unos LST seguros, y no debe interpretarse que los LST representan puntos de inflexión. Como estado de referencia para el soporte de la vida humana en la Tierra, utilizamos un sistema Tierra similar al Holoceno interglacial que funciona dominado por retroalimentaciones de equilibrio que hacen frente a las perturbaciones, las amortiguan y las atenúan. En Métodos e Información complementaria se detalla cómo se determinan los límites de seguridad.

En segundo lugar, utilizamos tres criterios para evaluar si la adhesión a los LST seguros podría proteger a las personas de daños significativos (Recuadro 1): la "justicia entre especies y la estabilidad del sistema Tierra" (I1)¹⁷; la "justicia intergeneracional"¹⁸ entre generaciones pasadas y presentes (I2a) y entre generaciones presentes y futuras (I2b); y la "justicia intrageneracional" (I3) entre países¹⁹, comunidades y personas a través de una perspectiva interseccional²⁰. Estos criterios se inscriben en un marco más amplio de justicia del Sistema Tierra que va más allá de la justicia planetaria y la relacionada con los problemas para adoptar un enfoque de justicia transformadora a varios niveles centrado en los fines (límites y niveles de acceso) y los medios^{21,22}. En Métodos e Información complementaria se ofrece información más detallada sobre el enfoque de justicia aplicado en este documento. Definimos el daño como los impactos negativos sobre los seres humanos, las comunidades y los países derivados del cambio del Sistema Tierra, además de los índices de fondo. El informe más reciente del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) identifica riesgos "graves" y motivos "elevados" de consternación cuando decenas o cientos de millones de personas

están expuestas a cambios en el clima, como aumentos de temperatura y fenómenos extremos²³. En este documento, definimos el daño significativo como los impactos negativos existenciales o irreversibles graves y generalizados en países, comunidades e individuos derivados del cambio del Sistema Tierra, como la pérdida de vidas, medios de subsistencia o ingresos; los desplazamientos; la pérdida de seguridad alimentaria, hídrica o nutricional; y las enfermedades crónicas, lesiones o malnutrición (en los Métodos complementarios se incluye un glosario). En tercer lugar, combinamos estos criterios de justicia con análisis históricos, normas sanitarias internacionales, modelización del sistema Tierra y opiniones de expertos para cuantificar unos LST seguros y justos que minimicen la exposición humana a daños significativos (ningún daño significativo [NDS]) derivados del cambio del sistema Tierra.

Fig. 1: LST seguros y justos (NDS) propuestos.



Visualización de los LST seguros (rojo oscuro), los LST justos (NDS) (azul), los casos en los que los límites seguros y justos (NDS) se alinean (verde) y los estados globales actuales (iconos de la Tierra). Los ejes radiales están normalizados a los LST seguros. Los límites globales principales o de estimación central (Tabla 1) se trazan para apoyar la comparación con el estado global actual, pero destacamos que también hemos definido límites subglobales y múltiples niveles de probabilidad para muchos ámbitos (Tabla 1). Para los aerosoles, sin embargo, mostramos los límites subglobales para comparar límites seguros y justos. En el caso del nitrógeno, trazamos con una línea azul discontinua la cuantificación del límite para los daños causados por el nitrato en las aguas subterráneas, al tiempo que señalamos que el límite justo también debe incorporar consideraciones de seguridad a través de la eutrofización, lo que conduce a un límite seguro y justo más estricto. El acceso mínimo al agua, los alimentos, la energía y las infraestructuras para todos los seres humanos (línea verde discontinua) podría constituir la base de un "corredor" seguro y justo (área verde rellena), pero aquí no cuantificamos esta base. En la Fig. 1 de Datos Ampliados se presentan visualizaciones alternativas.

Minimizar el daño significativo es una piedra angular de la legislación nacional e internacional y de la justicia correctiva^{24,25}. Nos centramos en evaluar los niveles de cambio del Sistema Tierra que conducen a una exposición generalizada a daños significativos, lo que conllevará mayores impactos cuando las poblaciones vulnerables estén expuestas³. Los métodos y la Información complementaria contienen detalles sobre cómo se determinan los límites justos. Los límites justos (NSH) descritos aquí son condiciones necesarias pero no suficientes para la justicia del Sistema Tierra, que también debe permitir el acceso a los recursos para todos²⁶ y la equidad distributiva y procedimental²². Una base que permita un acceso mínimo al agua, los alimentos, la energía y las infraestructuras para todos los seres humanos, junto con un techo de LST seguro y justo (NDS) de presión humana máxima permitida sobre los dominios biofísicos, podría constituir un "corredor" seguro y justo a lo largo del tiempo^{4,22} (Fig. 1).

Nuestra evaluación se basa en investigaciones anteriores y en consensos políticos basados en la ciencia, como el marco de los Límites Planetarios (LPs)²⁷, la economía de la dona²⁸ y los Objetivos de Desarrollo Sostenible²⁹, y va más allá de ellos, de las siguientes maneras. (1) Definimos los LST justos para evitar daños significativos utilizando las mismas unidades que los LST seguros para los mismos ámbitos y proponemos que los actores utilicen el más estricto de los límites seguros y justos para informar la fijación de objetivos. Los LPs sólo identifican los límites biofísicos seguros. Los objetivos sociales relacionados con el acceso a los recursos naturales o el daño causado por ellos adoptados en la Agenda 2030, la economía de la dona y otros enfoques^{28,30,31,32} no se cuantifican en unidades comparables o examinan únicamente las consecuencias de las actividades humanas en el sistema Tierra, no el daño causado a los seres humanos por el cambio del sistema Tierra. Articular nociones sociopolíticas, como la justicia del sistema Tierra, y convertir sus implicaciones en unidades biofísicas puede permitir comprender mejor el espacio en el que pueden desenvolverse los seres humanos. (2) Definimos los LST globales y subglobales en la mayoría de los ámbitos. El énfasis de los LPs en la escala global puede resultar inapropiado para la evaluación y gestión de ámbitos como la biosfera³³ y el agua dulce^{34,35,36,37}. (3) Establecemos límites a múltiples niveles de probabilidad para los estados del Sistema Tierra. (4) Las evaluaciones de los elementos de inflexión en el clima, la biosfera y otros dominios del Sistema Tierra son pruebas clave, aunque no exclusivas, de nuestros LST. En cambio, las recientes evaluaciones de los LPs hacen hincapié en los riesgos relacionados con el alejamiento de los rangos holocenos de variabilidad del sistema Tierra³⁸.

Recuadro 1 Los criterios de justicia "31" utilizados para analizar los LST seguros

Para más información, véase Gupta et al.²². Las advertencias relacionadas con el enfoque de justicia aplicado en este documento se tratan en Métodos e información complementaria.

Justicia entre especies y estabilidad del Sistema Tierra (I1)

La justicia interespecies pretende proteger a los seres humanos, a otras especies y a los ecosistemas, rechazando el excepcionalismo humano. En muchos ámbitos, la justicia interespecies podría lograrse manteniendo la estabilidad del sistema Tierra dentro de los LST seguros.

Justicia intergeneracional (I2a y I2b)

La justicia intergeneracional examina las relaciones y obligaciones entre generaciones, como el legado de las emisiones de gases de efecto invernadero o la destrucción de ecosistemas para los jóvenes y las personas futuras. Lograr la justicia intergeneracional exige reconocer las posibles consecuencias a largo plazo de las acciones a corto plazo y las compensaciones y sinergias asociadas a lo largo del tiempo. Definimos dos tipos de justicia

intergeneracional: (entre el pasado y el presente; I2a) si las acciones de las generaciones pasadas han minimizado el daño significativo a las generaciones actuales y (entre el presente y el futuro; I2b) la responsabilidad de las generaciones actuales de minimizar el daño significativo a las generaciones futuras.

Justicia intrageneracional: entre países, comunidades e individuos (I3)

La justicia intrageneracional incluye las relaciones entre individuos presentes, entre Estados (internacional), entre personas de distintos Estados (global) y entre miembros de una comunidad o ciudadanos (comunitaria o nacionalista). La justicia interseccional considera las identidades y categorías sociales múltiples y superpuestas (por ejemplo, género, raza, edad, clase y salud) que sustentan la desigualdad, la vulnerabilidad y la capacidad de respuesta. Lograr la justicia intrageneracional significa minimizar los daños significativos causados por un país a otro, por una comunidad a otra y por un individuo a otro.

Cuantificación de los LST

Para cada ámbito del Sistema Tierra, cuantificamos primero los límites seguros para mantener la resiliencia del Sistema Tierra, con múltiples niveles de probabilidad que reflejan la incertidumbre o variabilidad en la posición exacta del límite. El respeto de estos límites seguros pone en práctica nuestro criterio de "justicia entre especies y estabilidad del Sistema Tierra" (I1 en el Recuadro 1) y protegerá a las generaciones futuras frente a daños significativos derivados del cambio del Sistema Tierra (justicia intergeneracional; I2b en el Recuadro 1), pero puede no evitar daños significativos a las generaciones actuales, en particular a las poblaciones vulnerables (I2a y I3 en el Recuadro 1). De aquí que (1) propongamos que algunos límites sean más estrictos para proteger a las generaciones y ecosistemas actuales; (2) complementemos los límites seguros con normas a nivel local para proteger a las generaciones y ecosistemas actuales; y (3) si es probable que el límite cause dificultades considerables a las generaciones actuales, propongamos que se complemente con políticas que tengan en cuenta la justicia distributiva. También evaluamos el estado actual del sistema Tierra con respecto a cada uno de los LST seguros y justos.

Clima

Identificamos los LST seguros para el calentamiento (Fig. 1 y Tabla 1) basándonos en la minimización de las probabilidades de que se desencadenen elementos de inflexión climáticos; el mantenimiento de las funciones de la biosfera y la criosfera; y la consideración de la variabilidad climática del Holoceno ($<0,5-1,0$ °C) y de los interglaciares anteriores ($<1,5-2$ °C) (Métodos suplementarios). Algunos puntos de inflexión climáticos, como el colapso de la circulación o el retroceso de la Amazonia, presentan una elevada incertidumbre o una baja confianza en su dinámica y en sus umbrales potenciales de calentamiento¹⁶, pero los análisis complementarios del paleoclima y la biosfera respaldan de forma independiente la evaluación de los LST seguros para el clima. La función de la criosfera incluye el mantenimiento del permahielo en las altas latitudes septentrionales, las capas de hielo polar permanentes y los glaciares de montaña y la minimización de la pérdida de hielo marino. Consideramos que un calentamiento global superior a $1,0$ °C por encima de los niveles preindustriales, que ya se ha superado⁹, conlleva una probabilidad moderada de desencadenar elementos de inflexión, como el colapso de la capa de hielo de Groenlandia o el deshielo abrupto localizado del permahielo boreal¹⁶. Un calentamiento global de un grado centígrado es coherente con el límite de seguridad propuesto en 1990³⁹ y con el LP de 350 ppm de CO₂(ref. 27). Por encima de $1,5$ °C o $2,0$ °C de calentamiento, la probabilidad de que se desencadenen puntos de inflexión aumenta a alta o muy alta, respectivamente (confianza alta en la tabla 1 de datos ampliados). Los daños a la biosfera y el riesgo de que los sumideros globales de

carbono se conviertan en fuentes de carbono, lo que podría desencadenar nuevas retroalimentaciones climáticas, aumentan sustancialmente⁴⁰. Llegamos a la conclusión de que la estabilización en o por debajo de un LST seguro de 1,5 °C de calentamiento evita los impactos climáticos más graves sobre los seres humanos y otras especies, reforzando el límite de 1,5 °C establecido en el Acuerdo de París sobre el Cambio Climático.

La evaluación de los daños significativos del cambio climático sugiere la necesidad de un límite justo (NDS) más estricto. Con un calentamiento global de 1,0 °C, decenas de millones de personas estarían expuestas a temperaturas extremas de bulbo húmedo (Fig. 2), lo que suscita inquietud por la justicia intergeneracional e intrageneracional. Con un calentamiento de 1,5 °C, más de 200 millones de personas, desproporcionadamente las que ya son vulnerables, pobres y marginadas (injusticia intrageneracional), podrían verse expuestas a temperaturas medias anuales sin precedentes⁴¹, y más de 500 millones podrían verse expuestas a la subida del nivel del mar a largo plazo (Fig. 2 y Métodos). Estas cifras de personas perjudicadas superan con creces el principio ampliamente aceptado de "no dejar a nadie atrás"²⁹ y socavan la mayoría de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Además, las emisiones del pasado ya han provocado daños significativos, como fenómenos meteorológicos extremos, pérdida de hábitat por parte de comunidades indígenas en el Ártico, pérdida de superficie terrestre por parte de estados de baja altitud y aumento del nivel del mar o reducción de la recarga de aguas subterráneas por el cambio de los sistemas de deshielo glaciar³. Los impactos irreversibles de los elementos de inflexión de la criosfera y la biosfera comprometidos por las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero en las próximas décadas, pero que se desarrollan a lo largo de siglos o milenios, también amenazan la justicia intergeneracional (Métodos suplementarios). Llegamos a la conclusión de que si se quiere evitar la exposición de decenas de millones de personas a daños significativos, el límite justo (NDS) debería fijarse en 1,0 °C o por debajo. Dado que es posible que no se pueda volver a este límite en un futuro previsible, serán necesarias adaptaciones y compensaciones para reducir la sensibilidad al daño y la vulnerabilidad. Durante la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático de 2022 (COP-27), los países en desarrollo se centraron en efecto activamente en las cuestiones de adaptación, pérdidas y daños.

Biosfera

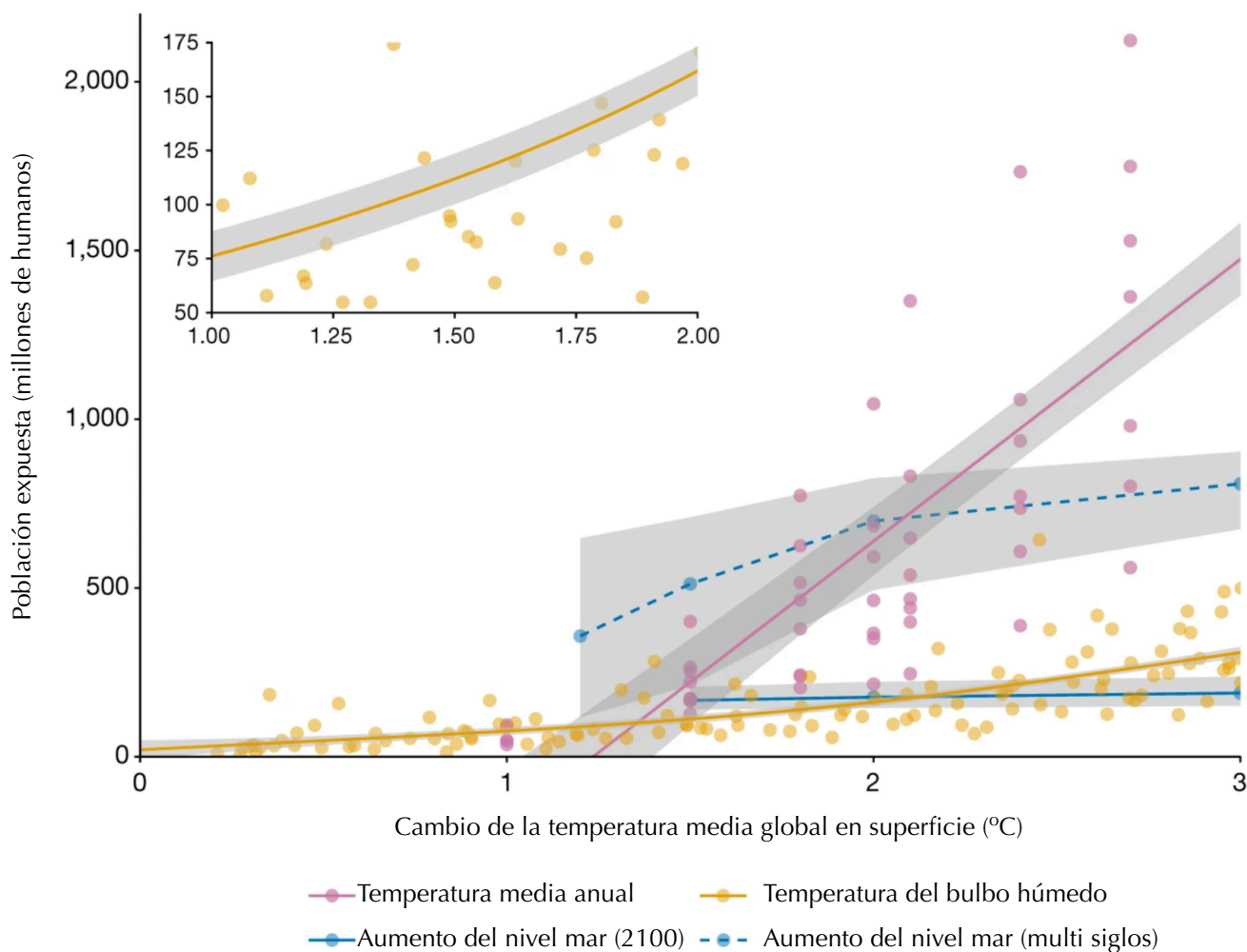
Para la biosfera, identificamos los LST seguros para dos medidas complementarias de la biodiversidad: (1) la superficie de ecosistemas naturales en gran medida intactos y (2) la integridad funcional de todos los ecosistemas, incluidos los ecosistemas urbanos y agrícolas (Tabla 1). El mantenimiento de zonas de ecosistemas naturales en gran medida intactos es necesario para garantizar las funciones del sistema Tierra de las que dependen todos los seres humanos, otras especies (11 en el Cuadro 1) y la estabilidad del sistema Tierra, incluidas las reservas y los estados de flujo de carbono, agua y nutrientes, y para detener la extinción de especies (contribución de la naturaleza a la gente (CNG) a través de las funciones del sistema Tierra). Basándonos en los resultados de los modelos de conservación del clima, el agua y las especies, proponemos unos LST seguros del 50-60% (confianza media en la Tabla 1 de Datos Extendidos) de la superficie terrestre mundial cubierta por áreas naturales en gran parte intactas para mantener la CNG del sistema Tierra (Tabla 1 y Métodos Suplementarios). Este rango utiliza la superficie actual de cobertura terrestre natural como valor mínimo, al tiempo que indica la necesidad de restaurar las áreas naturales en gran parte intactas. El límite exacto seguro depende en gran medida de la demanda de funciones ecológicas específicas (que a su vez dependen, por ejemplo, de las emisiones de carbono restantes que deben secuestrarse) y de la distribución espacial de la superficie natural en gran medida intacta en las ecorregiones y los ecosistemas. En general, los estudios indican que puede ser necesario hasta el 60% de la superficie terrestre, y algunos llegan hasta el 80% (Métodos suplementarios). En el océano se necesitan zonas de ecosistemas naturales comparables al 50-60% de LST terrestre para mantener la captura de carbono y minimizar la extinción adicional de especies marinas⁴². Los límites a escala biológica pueden ser más estrictos: por ejemplo, para proteger los biomas forestales tropicales debido a su contribución a la estabilidad climática y al reciclaje de la

humedad. Si la asignación y la coordinación de los esfuerzos de restauración no son óptimas, la superficie mínima requerida será mayor. Si se transgreden estos límites, pueden desencadenarse puntos de inflexión que impliquen la pérdida de la integridad funcional a escala del bioma y la CNG asociada, incluido el aumento de las tasas de extinción de especies.

Tabla 1 Los LST seguros y justos propuestos (visualizados en la Fig. 1)

Ámbito: variable de estado	Cambios relevantes en Sistema Tierra	LST seguros subglobales (locales/regionales)	LST seguros agregados globalmente	Sólo (NDS) LST	LST seguros y justos	Estado global actual
Clima: cambio de temperatura media global en superficie desde la era preindustrial (1850-1900)	Puntos de inflexión climáticos; superación del rango interglaciar; funcionamiento de biosfera	La frontera climática mundial se fija para evitar puntos de inflexión regionales y la degradación de biomas	Probabilidad de superar los puntos de inflexión: baja, 0,5-1,0 °C; moderada, >1,0 °C; alta, >1,5 °C; muy alta, >2,0 °C	Exposición a daños significativos adicionales: moderada, 0,5-1 °C; alta, 1-1,5 °C; muy alta, >1,5 °C.	1,0 °C a alta exposición a daños significativos	1.2 °C
Biosfera: zona de ecosistemas naturales	Pérdida de clima, agua y biodiversidad CNG	Hay que preservar o restaurar los ecosistemas naturales críticos	>50-60% de superficie de ecosistema natural (dependiendo de la distribución espacial)	Alinearse con el límite de seguridad y garantizar la justicia distributiva	>50-60% (extremo superior) según la distribución	45-50% de superficie de ecosistemas naturales
Biosfera: integridad funcional	Pérdida de varios CNG locales	>20-25% de cada 1 km ² bajo vegetación (semi)natural; >50% en paisajes vulnerables; en <10%, quedan pocos CNG.	El 100% de la superficie se ajusta a los límites locales	Alinearse con el límite de seguridad	>20-25% de cada 1 km ² bajo vegetación (semi)natural	⅓ (31-36%) de la superficie terrestre dominada por humanos satisface exigencias de LST.
Agua: flujos de las aguas superficiales	Colapso de los ecosistemas de agua dulce	magnitud <20% alteración mensual del flujo superficial	100% superficie terrestre satisface límite local (suma 7.630 km ³ /año de presupuesto global alteración del flujo)	Cumplir las normas de calidad de la Organización Mundial de la Salud y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.	LST seguros a escala regional y mundial	66% superficie terrestre mundial satisface LST/año (3.553 km ³ de alteraciones globales)
Agua: niveles freáticos	Colapso de ecosistemas dependientes de las aguas freáticas	La reducción anual no supera la recarga media anual	El 100% superficie terrestre cumple el límite local (suma de 15.800 km ³ anuales de reducción global)	Cumplir normas de calidad de la OMS y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.	LST seguros (y garantizar la recuperación)	53% de superficie terrestre mundial satisface LST/año (15.700 km ³ de reducción)
Agua verde ³⁸ (evaluación anterior)	No evaluado	Humedad/mes del suelo zona radicular se desvía de variabilidad Holocen	<10% de la superficie libre de hielo supera el límite	No evaluado	No evaluado	18 %
Ciclos de nutrientes: nitrógeno	Eutrofización de las aguas superficiales y los ecosistemas terrestres	<2,5 (1-4) mg N l ⁻¹ en aguas superficiales; <5-20 kg N ha ⁻¹ al año en ecosistemas terrestres (depende del bioma).	Excedente, <61 (35-84) Tg N al año; aporte total, <143 (87-189) Tg N al año	Cumplir normas locales sobre agua potable (<11,3 (10-11,3) mg NO ₃ -N l ⁻¹ ; a escala mundial, <117 (111-117) Tg N al año) y contaminación atmosférica (por ejemplo, NH ₃).	LST locales; y excedente global, 57 (34-74) Tg N al año	Excedente, 119 Tg N al año; aporte total, 232 Tg N al año
Ciclos de nutrientes: fósforo	Eutrofización de las aguas superficiales	<50-100 mg P por m ³	Excedente, <4,5-9 Tg P al año; aporte minero, <16 (8-17) Tg P al año	Alineación con el límite de seguridad local para evitar la eutrofización	LST seguros a escala local y mundial	Excedente, ~10 Tg P al año; aporte minero, ~17 Tg P al año
Atmósfera: carga de aerosoles	Sistemas de monzones	<0.25–0.50 POA	Diferencia media anual interhemisférica POA: <0.15	Alinear con seguro más <15 µg por m ³ de PM _{2,5} media anual; otros niveles de exposición a daños significativos en la tabla suplementaria 11.	<15 µg por m ³ PM _{2,5} más los LST seguros regionales y mundiales	0,05 diferencia media anual interhemisférica POA

Fig. 2: Exposición a daños significativos derivados del cambio climático con diferentes niveles de calentamiento.



Examinamos la exposición de la población mundial de 2010 a temperaturas medias anuales superiores a 29 °C (púrpura; ajuste lineal, $P < 0,01$), temperaturas de bulbo húmedo de 35 °C durante una media de al menos 1 día al año (naranja; ajuste cuadrático, $P < 0,01$) y futura subida del nivel del mar (azul; interpolación lineal). El aumento del nivel del mar se calcula para las respuestas de 2100 (azul sólido) y de varios siglos (azul discontinuo; interpolación lineal) a una determinada estabilización de la temperatura para 2100, lo que representa los impactos a corto plazo y los equilibrios a largo plazo, respectivamente. El encaje muestra la ampliación de la temperatura de bulbo húmedo en el intervalo de 1-2 °C. El sombreado indica un e.s.

La adhesión a nuestra propuesta de LST seguros para la zona de ecosistemas naturales en gran parte intactos debería minimizar el daño a las generaciones futuras (I2b en el Recuadro 1) al garantizar las contribuciones de la biosfera a todo el soporte vital a través de un sistema Tierra estable y resiliente y una CNG localizada proporcionada por la naturaleza en gran parte intacta. Sin embargo, lograr la justicia para las generaciones actuales (I2a y I3 en el Recuadro 1) puede requerir un límite más estricto porque los LST seguros no tiene en cuenta la actual distribución desigual de los ecosistemas naturales en gran medida intactos necesarios para mantener los medios de vida locales⁴³, especialmente en las comunidades pobres o indígenas^{44,45}. Algunas personas y países pueden beneficiarse directamente de las políticas para mantener o aumentar la superficie de los ecosistemas naturales⁴⁶, mientras que otros pueden enfrentarse a costes

de oportunidad⁴⁷. De aquí que, para garantizar una distribución justa de los ecosistemas naturales en gran parte intactos, puede ser necesario establecer un límite justo (NDS) en el extremo superior del rango seguro del 50-60%, ya que la asignación será inferior a la óptima para lograr las funciones para las que se optimizó el límite inferior. Hacemos hincapié en que el área de ecosistema natural incluye todas las áreas naturales en gran medida intactas y no sólo aquellas que actualmente requieren atención para su conservación; no implica una protección que excluya la habitación humana y el uso sostenible.

La integridad funcional es la capacidad de los ecosistemas urbanos, agrícolas u otros modificados por el hombre para proporcionar funciones ecológicas y sus contribuciones a las personas a escala de paisaje, complementando la CNG del sistema Tierra proporcionado por áreas de ecosistemas naturales intactos a gran escala. Analizamos qué cantidad, calidad y distancia mínimas de hábitat natural y seminatural son necesarias para mantener la provisión local de las CNG terrestres, incluyendo la polinización, el control de plagas y enfermedades, la regulación de la calidad del agua, la protección del suelo, la mitigación de riesgos naturales y el ocio. Hemos determinado que se necesita al menos un 20-25% de hábitat seminatural diverso que incluya especies autóctonas en cada kilómetro cuadrado de tierras modificadas por el hombre para apoyar la provisión de múltiples CNG locales⁴⁸. La cantidad exacta y la calidad requeridas difieren según el tipo de paisaje, el clima y la topografía; la cantidad puede llegar hasta el 50% en algunos paisajes vulnerables a riesgos naturales, como laderas empinadas o suelos muy erosionables. Este límite se aplica a escalas finas, actualmente propuestas en 1 km², porque las CNG no son transferibles (por ejemplo, la erosión o el corrimiento de tierras sólo pueden evitarse con una cubierta natural en la misma ladera) y a menudo son proporcionadas o apoyadas por especies no móviles o de movilidad limitada (por ejemplo, los rangos de forrajeo de los insectos polinizadores o reguladores de plagas se limitan a unos cientos de metros). Alrededor de dos tercios de la superficie terrestre dominada por el hombre (aproximadamente el 40% de la superficie terrestre total) tiene una integridad funcional insuficiente (Métodos suplementarios), y grandes áreas están mostrando síntomas de pérdida de resiliencia⁴⁹, lo que requiere prácticas regenerativas para restaurar las funciones locales y del sistema Tierra.

El límite seguro para la integridad funcional reduce la exposición futura a daños significativos (justicia intergeneracional). La pérdida de integridad funcional en los ecosistemas agrícolas y las ciudades por debajo del límite seguro reduciría la productividad alimentaria, la capacidad de los ecosistemas para mitigar los riesgos naturales, la contaminación y las pérdidas de nutrientes, y aumentaría la dependencia de pesticidas y biocidas nocivos y la capacidad de elegir usos alternativos de la tierra (justicia intrageneracional). La dependencia de estos servicios suele ser mayor en las regiones con comunidades más vulnerables. Las intervenciones específicas que garantizan la integridad funcional son muy locales y se aplican mejor bajo la autoridad, los conocimientos y el liderazgo locales⁵⁰, siendo a menudo necesarias intervenciones políticas para garantizar que los grupos marginados no queden aún más desprovistos de poder, sino que se les dé el espacio necesario para utilizar sus conocimientos y enfoques para participar en tales procesos⁵¹.

Agua

Para el agua dulce, proponemos dos LST seguros definidos espacialmente y basados en límites subglobales que pueden agregarse a escala global: (1) un LST de alteración del flujo para las aguas superficiales y (2) un LST de reducción del caudal para las aguas subterráneas (Tabla 1). La alteración de los caudales en los ríos es uno de los principales impulsores de la pérdida de biodiversidad de agua dulce⁵², lo que provoca un declive de la biodiversidad de agua dulce superior al de los sistemas terrestres y marinos⁵³ y al de los CNG a gran escala, como las pesquerías costeras y continentales, de las que dependen millones de personas^{54,55}. Los análisis de la ecología de los caudales a escala local se utilizan a menudo para establecer las necesidades de caudales ambientales con el fin de definir los niveles seguros de

alteración de los caudales para cuencas hidrográficas concretas⁵⁶. Estas valoraciones a escala local podrían servir de base para establecer límites de seguridad espacialmente explícitos, pero no existen en la mayor parte del mundo⁵⁷. En su defecto, proponemos que en todos los ríos del mundo se cumpla un presunto LST seguro subglobal del 20% de alteración (aumento o disminución) de los caudales mensuales de aguas superficiales en comparación con el régimen predominante de caudales naturales (confianza media en la tabla 1 de datos ampliados). Este LST deja el 80% de los caudales inalterados para satisfacer las necesidades medioambientales^{58,59}, suponiendo que también se cumplan las normas de calidad del agua exigidas. El LST está respaldado por estudios empíricos que demuestran que las alteraciones del caudal por debajo del 20% favorecen a las especies de peces autóctonas y que la alteración del caudal por encima de este nivel afecta gravemente a la biodiversidad y a la estructura y función del ecosistema^{60,61} (los Métodos complementarios contienen referencias adicionales que respaldan el uso de este umbral). El LST global para las aguas superficiales es que el 100% de toda la superficie terrestre cumpla el límite subglobal limitando las alteraciones de los caudales en un 20% en todos los ríos del mundo. El cumplimiento del LST global supone un presupuesto de alteración global de 7.630 km³ al año (Métodos suplementarios; con un nivel de confianza alto en la Tabla 1 de datos ampliados). Las alteraciones del caudal fluvial agregadas a escala mundial son actualmente inferiores a esta cifra; sin embargo, estamos fuera del LST global porque el LST seguro subglobal sólo se cumple para el 66% de la superficie terrestre (Tabla 1) y para menos de la mitad de la población mundial (Métodos suplementarios). Estos resultados son coherentes con análisis recientes sobre la escasez de agua, que ponen de relieve el reto que supone cumplir los requisitos de estado de flujo ambiental para mantener los servicios ecosistémicos, como la producción pesquera, y garantizar al mismo tiempo que haya agua suficiente para las necesidades humanas^{57,62}.

Los acuíferos de aguas subterráneas contribuyen a los flujos base de muchos sistemas fluviales y sustentan directamente los humedales y la vegetación terrestre. Los niveles inseguros de extracción de aguas subterráneas se producen cuando la extracción supera las tasas de reposición, lo que afecta a los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas y, en algunos casos, provoca el hundimiento del terreno y la pérdida irreversible de acuíferos^{12,63,64}. Dada la naturaleza temporal de la recarga y descarga de las aguas subterráneas y la falta de datos coherentes y generalizados sobre los niveles históricos de los acuíferos, proponemos que el LST seguro para la reducción anual de las aguas subterráneas de todos los acuíferos sea la recarga anual media, y que las aguas subterráneas se consideren seguras si la reducción es inferior a la recarga. El LST seguro subglobal se cumple para un acuífero dado cuando la reducción local no supera la recarga anual media. El LST global para las aguas subterráneas es aquella que cumple el LST subglobal para todos los acuíferos del mundo. Para el periodo 2003-2016, la suma global de la recarga media anual es de aproximadamente 16.000 km³ al año (Tabla 1 y Métodos Suplementarios; con un nivel de confianza alto en la Tabla 1 de Datos Extendidos). La extracción de aguas subterráneas que puede producirse con seguridad dentro de este límite varía naturalmente en todo el planeta y, en la medida de lo posible, debería definirse basándose en un seguimiento a escala local, aunque también pueden determinarse tendencias generales mediante teledetección por satélite⁶⁵. Estimamos que actualmente nos encontramos fuera del LST global porque los niveles de agua subterránea en el 47% de las cuencas están actualmente en descenso (Tabla 1).

Nuestro análisis de justicia de los LST seguros para las aguas superficiales y subterráneas pone de relieve los retos de (1) la distribución multinivel, (2) la inseguridad del agua y (3) la calidad del agua. Los LST regionales de aguas superficiales y subterráneas suelen redundar en beneficio de los intereses a largo plazo de las comunidades circundantes, ya que conservan el agua dulce del futuro (justicia intergeneracional: I2b en el recuadro 1). En los casos en que los acuíferos agotados ya hayan causado impactos ambientales significativos⁶⁶, debe reducirse urgentemente la extracción de aguas subterráneas y deben protegerse las zonas de recarga para restablecer los acuíferos a niveles seguros (NDS para las generaciones actuales: I2a y I3 en el Recuadro 1). Para minimizar los daños significativos a las generaciones actuales

también es necesario lo siguiente (1) Tener en cuenta que la distribución multinivel indica la asignación de las alteraciones permitidas entre comunidades, sectores o naciones que comparten la masa de agua, ya sea directa o indirectamente a través del agua virtual. Esta asignación es especialmente difícil cuando los LST seguros exigen reducciones drásticas del uso del agua. (2) La minimización de la exposición a daños significativos debe tener en cuenta la inseguridad del agua en las distintas regiones del mundo. Por ejemplo, los daños asociados a unas condiciones deficientes de saneamiento e higiene del agua afectan de manera desproporcionada a la salud de los niños pequeños en los países de renta baja⁶⁷, especialmente en el África subsahariana y el sur de Asia⁶⁸. (3) Minimizar la exposición a daños significativos implica abordar las directrices de calidad de las aguas superficiales para uso humano⁶⁹, no sólo una asignación de la cantidad de agua. Como mínimo, el agua debe ser segura para el consumo y el riego, lo que significa que deben cumplirse normas aceptables de coliformes fecales y salinidad. Alineamos nuestros LST justos (NDS) para el agua con los LST seguros, al tiempo que señalamos que atenerse a los límites restringiría considerablemente el uso actual y requerirá políticas que garanticen la justicia distributiva.

Estos LST propuestos para las aguas superficiales y subterráneas son independientes de las reservas de agua verde. Las reservas de agua verde son fundamentales para mantener el ciclo atmosférico del agua, que regula los niveles de precipitaciones estacionales³⁴; pueden sustentar una proporción significativa de la producción agrícola mundial⁷⁰ con un impacto menor en los ecosistemas acuáticos que el uso del agua azul⁷¹; y están estrechamente relacionadas con los LST de la biosfera. Una evaluación reciente³⁸ propuso un límite de agua verde espacialmente explícito para garantizar la regulación hidrológica de los ecosistemas terrestres, el clima y los procesos biogeoquímicos mediante la definición de una desviación máxima permitida (deseccación o humectación) de los niveles de humedad del suelo con respecto a las condiciones de mediados del Holoceno. La variable de estado para el agua verde se define como el porcentaje de superficie terrestre libre de hielo que en cualquier mes tiene niveles de humedad del suelo en la zona radicular fuera del percentil 95 de la variabilidad de la línea de base local. El valor límite se fija en el 10%, correspondiente al nivel medio de desviación de las condiciones de mediados del Holoceno. Incluimos este límite de agua verde en nuestro conjunto de LST seguros (Tabla 1), pero limitamos nuestro análisis de justicia intergeneracional e intrageneracional (I2 e I3 en el Recuadro 1) a las aguas azules superficiales y subterráneas.

Nutrientes

Establecemos los LST seguros para los excedentes de nitrógeno (N) y fósforo (P) de la agricultura con el fin de minimizar la eutrofización de las aguas superficiales y los ecosistemas terrestres debida a la escorrentía, la lixiviación y la deposición atmosférica de N a través de las emisiones de amoníaco y óxido de nitrógeno (Tabla 1). Proponemos unos LST seguros a escala global de 61 (35-84) Tg de N al año para el excedente de nitrógeno agrícola⁷² y de 4,5-9,0 Tg de P al año para el excedente de fósforo del suelo de las tierras de cultivo^{73,74} (confianza media en la Tabla 1 de datos ampliados). Estos LST se basan en trabajos recientes^{72,74} que calculan las pérdidas, los excedentes y las entradas de nutrientes agrícolas globales y subglobales a partir de concentraciones críticas de N y P en el agua y el aire más allá de las cuales se produce la eutrofización (Métodos, Tabla 1 y Métodos suplementarios). Estos LST se refieren principalmente a la agricultura, que representa aproximadamente el 90% de las aportaciones antropogénicas de N/P al sistema terrestre^{72,75}. Nuestros LST se basan en los excedentes y pérdidas agrícolas^{72,74}, aunque para compararlos con las cuantificaciones previas de LP (Métodos Suplementarios), también proporcionamos los correspondientes aportes globales asumiendo la eficiencia actual de uso del N/P. Estos estudios recientes también tienen en cuenta las fuentes no agrícolas, suponiendo que se mantienen en los niveles actuales, y la redistribución de nutrientes de regiones sobrefertilizadas a regiones infra-fertilizadas (Métodos suplementarios).

Las concentraciones elevadas de N y P causan daños por las consecuencias de la eutrofización en los ecosistemas y sus servicios, como el colapso de las pesquerías, los compuestos tóxicos liberados por la proliferación de algas^{72,76} y los efectos sobre la salud de la contaminación atmosférica por aerosoles derivados del amoníaco⁷⁷. También pueden producirse daños por el consumo de aguas superficiales o subterráneas con concentraciones elevadas de nitratos⁷⁸ pero a un nivel superior a la concentración segura de N para la eutrofización de las aguas superficiales. Por lo tanto, alineamos los LST justos (NSH) para el N subglobal y el P global y subglobal con sus límites seguros, ya que el daño humano derivado de la alteración del ciclo de los nutrientes se debe principalmente a la degradación del medio ambiente. La contabilización de los daños significativos provocados por los nitratos de las aguas subterráneas hace que el límite global de N sea ligeramente más estricto, situándose en 57 (34-74) Tg N al año (Métodos suplementarios). Estos LST deberían complementarse con normas relativas a la contaminación local del aire y del agua para el N y del agua para el P. Otras consideraciones de justicia incluyen la falta de acceso a los fertilizantes de N y P, que puede amenazar la seguridad alimentaria, especialmente de las comunidades y países de renta baja⁷⁶, y la extracción de roca fosfórica, que es un recurso limitado que actualmente sustenta la producción de alimentos pero expone a las comunidades pobres y marginadas a los residuos de la minería, a la destrucción de tierras y a abusos de los derechos humanos^{76,79}.

Contaminación por aerosoles

En el caso de los aerosoles, proponemos un LST seguro definido por la diferencia interhemisférica en la profundidad óptica de los aerosoles (POA) (Tabla 1) basado en la evidencia de que una diferencia creciente entre los hemisferios norte y sur puede desencadenar puntos de inflexión a escala regional y causar efectos adversos sustanciales en los ciclos hidrológicos regionales, además del LP existente de 0,25-0,50 POA basado en consideraciones regionales²⁷.

Consideramos las diferencias de POA y sus impactos potenciales derivados de las emisiones naturales, las emisiones antropogénicas y la inyección de aerosoles estratosféricos (geoingeniería solar). Los datos de observación de las precipitaciones del monzón de África Occidental⁸⁰ y los estudios de modelización climática del monzón de la India⁸¹ han identificado posibles cambios en la ubicación de la Zona de Convergencia Intertropical provocados por las diferencias en la POA de sulfato entre los hemisferios norte y sur⁸¹. Se carece de estudios observacionales sobre los impactos de la diferencia interhemisférica de POA en el monzón de la India, pero las observaciones basadas en erupciones volcánicas pasadas y los estudios de modelización climática muestran que una mayor concentración de aerosoles reflectantes en un hemisferio conduce a una disminución de las precipitaciones en las regiones tropicales monzónicas del mismo hemisferio, mientras que aumentan en el hemisferio opuesto^{80,82,83}. Los cambios observados en el monzón del sur de Asia tienen mecanismos bien comprendidos (Información suplementaria) que concuerdan con los efectos de la diferencia interhemisférica de POA⁸⁴. Las erupciones volcánicas de El Chichón en la década de 1980 (diferencia de POA de 0,07) y Katmai (diferencia de POA de 0,08) proporcionan ejemplos empíricos⁸⁰, mientras que las diferencias de POA simuladas por modelos de 0,1 y aproximadamente 0,2 conducen a una disminución de las precipitaciones en las regiones tropicales monzónicas⁸⁵. La diferencia interhemisférica de POA y su impacto en los cambios de las precipitaciones tropicales son sensibles al tamaño de las partículas de aerosol y a la distribución latitudinal y altitudinal de los aerosoles reflectantes⁸⁶. Teniendo en cuenta esto y el rango de estos estudios (aproximadamente 0,05-0,20 de diferencia de POA adicional), evaluamos que estos cambios pueden llegar a ser perturbadores si la diferencia de POA interhemisférica, actualmente aproximadamente 0,0587 de media y aproximadamente 0,1 en la primavera y el verano boreales⁸⁷, supera 0,15 (confianza baja en la Tabla 1 de Datos Extendidos) debido a la contaminación atmosférica⁸⁵ o a las asimetrías de aerosoles relacionadas con la geoingeniería^{81,85} (Métodos Suplementarios).

Los daños significativos para la salud humana derivados de la exposición a aerosoles, como las partículas (PM), sugieren un límite justo (NDS) más estricto basado en las normas locales de contaminación atmosférica⁸⁸. Las PM y otros

aerosoles están asociados a enfermedades respiratorias y muertes prematuras, así como a problemas cardíacos y asma debilitante⁸⁹. Seleccionamos un límite justo (NDS) de 15 µg por m³ de exposición media anual a PM_{2,5} para evitar una alta probabilidad de daños significativos por aerosoles (Tabla 1 e Información de apoyo) basándonos en las directrices de la Organización Mundial de la Salud 2021⁸⁸ (Tabla 1) y en las normas de calidad del aire de la Unión Europea y de la Agencia de Protección Ambiental de EUA^{90,91}. Esta orientación local y regional es necesaria porque las características de las PM_{2,5}, tales como la toxicidad, son altamente específicas del lugar y de la fuente. En la actualidad, el 85% de la población mundial está expuesta a concentraciones de PM_{2,5} superiores a este límite⁹², y se calcula que la exposición a las PM_{2,5} ambientales causa 4,2 millones de muertes al año⁸⁹, siendo los grupos vulnerables los más afectados de forma desproporcionada mientras que son los que menos contaminan⁹³. Los escenarios de contaminación atmosférica basados en una mitigación y un control de la contaminación rigurosos que han tenido éxito a nivel mundial muestran reducciones en las poblaciones afectadas, pero las zonas de alta contaminación atmosférica podrían permanecer⁹⁴. Una concentración de 15 µg por m³ de PM_{2,5} se traduce^{95,96} en una POA de aproximadamente 0,17, lo que indica que el límite justo (NDS) para los aerosoles es más estricto que el límite regional seguro (0,25-0,50) (Tabla 1).

Nuevas entidades y otros contaminantes

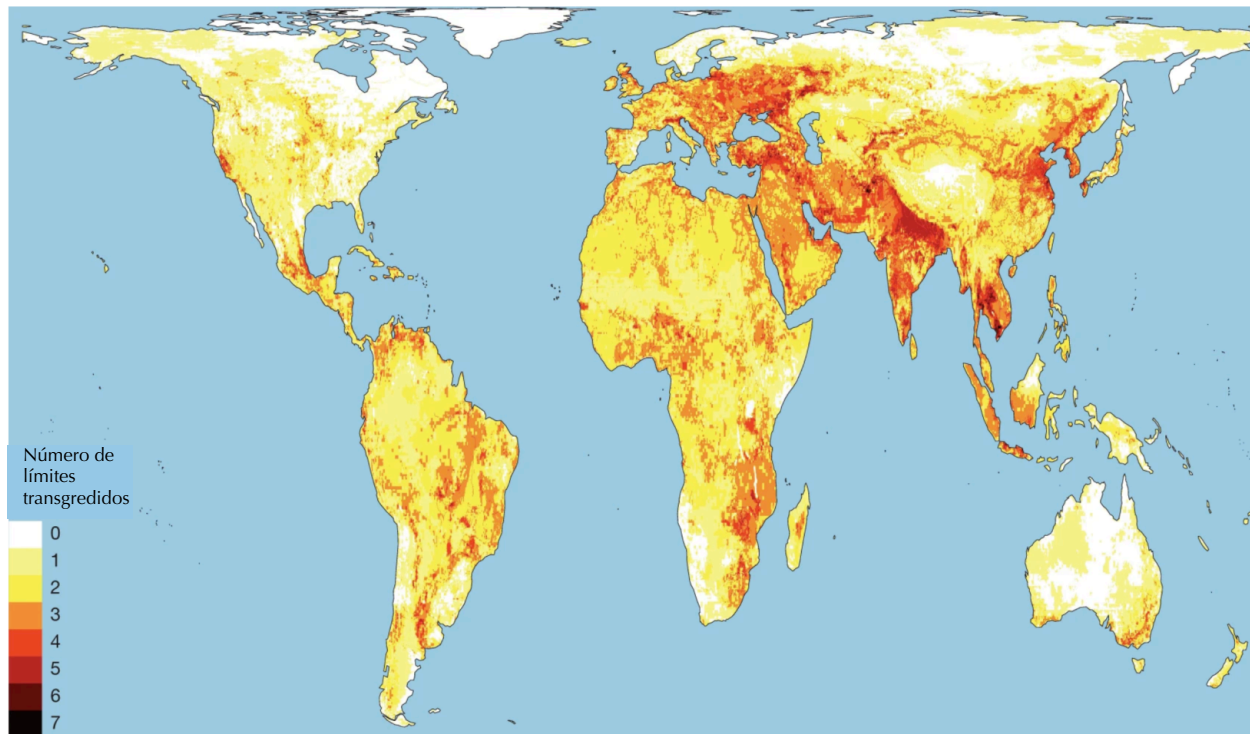
Reconocemos los riesgos para la estabilidad del Sistema Tierra y el bienestar humano de otros contaminantes del aire y el agua, para los que ya existen directrices bien aceptadas⁸⁸, y las amenazas emergentes de nuevas entidades, nuevas formas de sustancias existentes y formas de vida modificadas que son nuevas desde el punto de vista geológico o evolutivo y podrían tener impactos geofísicos o biológicos no deseados a gran escala en el Sistema Tierra^{27,97}. Cada vez hay más pruebas de los diversos riesgos potenciales de entidades nuevas, como los microplásticos, las "sustancias químicas eternas", los antibióticos, los residuos radiactivos, los metales pesados u otros contaminantes emergentes, para el funcionamiento del Sistema Tierra y la salud humana y la seguridad alimentaria, pero siguen existiendo lagunas de conocimiento sobre la escala y el alcance de los impactos potenciales⁹⁸. Persson et al.⁹⁷ reportaron que la humanidad ha cruzado el LP de las nuevas entidades, aunque las limitaciones de los datos y la cuantificación son un reto incluso para las nuevas entidades conocidas. Los impactos diferenciados de las nuevas entidades que ya se observan hoy en distintas poblaciones y la larga vida útil de estas sustancias plantean claras preocupaciones de justicia intrageneracional e intergeneracional^{97,98}.

Estado actual

Siete de los ocho LST seguros y justos a escala global que hemos cuantificado ya han sido transgredidos (Fig. 1 y Tabla 1). La transgresión de los LST está espacialmente extendida, con dos o más LST seguros y justos transgredidos en el 52% de la superficie terrestre mundial, afectando al 86% de la población global (Fig. 3). Algunas comunidades experimentan muchas transgresiones de los LST, con cuatro o más LST transgredidos para el 28% de la población mundial, pero sólo el 5% de la superficie terrestre mundial (Fig. 3). Las transgresiones de los puntos críticos espaciales se concentran, por tanto, en las regiones de mayor densidad de población, lo que plantea importantes consternaciones en materia de justicia intrageneracional.

Siete de los ocho LST seguros y justos a escala global que hemos cuantificado ya han sido transgredidos.

Fig. 3: Puntos calientes de las transgresiones actuales de los LST.



El número de clima subglobal (dos límites locales de exposición), integridad funcional, aguas superficiales, aguas freáticas, nitrógeno, fósforo y los LST seguros y justos transgredidos actualmente por ubicación. No más de siete de estas ocho métricas tienen sus LST transgredidos en cualquier píxel. Dado que el clima es un LST definido globalmente, utilizamos las temperaturas de bulbo húmedo superiores a 35 °C durante al menos 1 día al año y las zonas costeras de baja elevación (<5 m) expuestas a la subida del nivel del mar como sustitutos de la transgresión climática local, al tiempo que reconocemos que los impactos del cambio climático son mucho más diversos. También hacemos hincapié en que la exposición de un lugar no implica necesariamente la responsabilidad de causar o abordar estos impactos ambientales. Invitamos al lector a investigar las consecuencias de distintos valores límite utilizando el código que figura en la información sobre disponibilidad del código.

Hacia un futuro seguro y justo

Definimos y cuantificamos los LST seguros y justos (NDS) para sostener Los bienes comunes globales que regulan el estado del planeta, protegen a otras especies, generan CNG, reducen el daño significativo a los seres humanos y apoyan el desarrollo humano inclusivo (Fig. 1 y Tabla 1). Dado que sobrepasar los límites seguros provoca un daño significativo generalizado, nuestros LST seguros y justos se alinean para las aguas superficiales, las aguas freáticas, la integridad funcional, la superficie de los ecosistemas naturales, el fósforo y el nitrógeno. Sin embargo, alcanzar estos límites sin transformación podría perjudicar significativamente a las generaciones actuales. En dos casos, los aerosoles y el clima, los límites justos son más estrictos que los límites seguros, lo que indica que las personas experimentan un daño significativo antes de que se desestabilice ese dominio del Sistema Tierra.

Identificamos los LST subglobales, que, en muchos ámbitos, constituyen la escala de actuación pertinente para evitar la pérdida de estabilidad del sistema Tierra y minimizar la exposición a daños significativos, y los LST globales, que son puntos de referencia para el seguimiento de los impactos humanos a escala del sistema Tierra. Las naciones, las ciudades, las empresas y otros actores clave tienen que fijar y alcanzar objetivos basados en la ciencia para reducir sus impactos ambientales sobre la base de la traducción de los LST seguros y justos a actores justos⁹⁹. El clima es el único

LST que cuenta con una metodología relativamente bien establecida y aplicada^{100,101}, y se están desarrollando metodologías para otros ámbitos^{101,102}. Insistimos en que nuestros LST complementan, no anulan, las restricciones medioambientales para entornos locales específicos: por ejemplo, límites de la biosfera más estrictos para ecosistemas densos en carbono o esfuerzos de conservación específicos para proteger especies emblemáticas o en peligro de extinción. También reconocemos que otros agentes pueden optar por aplicar objetivos basados en otros niveles de probabilidad distintos de los que hemos destacado (Fig. 1 y Tabla 1): por ejemplo, una tolerancia al riesgo menor que el alto riesgo de rebasar los puntos de inflexión asociado a un límite seguro de 1,5 °C.

Ofrecemos nuestros LST como una integración de las ciencias sociales y naturales para su posterior perfeccionamiento, en el espíritu en que se propusieron los LPs hace más de una década¹⁰³. Siete de los ocho LST cuantificados globalmente han sido cruzados y al menos dos LST locales en gran parte del mundo han sido cruzados, poniendo en riesgo el sustento humano de las generaciones actuales y futuras. Para garantizar el bienestar humano se requiere nada menos que una transformación global justa en todos los LST. Dichas transformaciones deben ser sistémicas en los sectores energético, alimentario, urbano y otros, abordar los impulsores económicos, tecnológicos, políticos y de otro tipo del cambio del sistema Tierra, y garantizar el acceso de los pobres mediante la reducción y reasignación del uso de los recursos. Todo parece indicar que no será un viaje lineal; requiere un salto en nuestra comprensión de cómo la justicia, la economía, la tecnología y la cooperación mundial pueden ponerse al servicio de un futuro seguro y justo.

Métodos

Este trabajo es un resultado de la Comisión de la Tierra, una iniciativa internacional independiente de evaluación científica auspiciada por Future Earth (<https://earthcommission.org/>). La síntesis que aquí se presenta se basa en trabajos recientes de la Comisión de la Tierra; otras publicaciones científicas, como los LPs; informes intergubernamentales, como los del IPCC; y directrices de la Organización Mundial de la Salud. Como componente científico de la Global Commons Alliance (<https://globalcommonsalliance.org/>), la teoría del cambio de la Comisión de la Tierra incluye el suministro de nuestros resultados sobre los LST a la Science-Based Targets Network, al Systems Change Lab y al Earth HQ.

Aunque reconocemos que toda evaluación científica entraña cierta subjetividad, hemos tomado varias medidas para garantizar el rigor científico de nuestros LST. (1) Nuestro análisis se fundamenta en una base empírica rigurosa (los LST seguros y los Métodos complementarios). (2) En la medida de lo posible, determinamos las LST en varios niveles de probabilidad (para el cambio climático, 0,5 °C para una probabilidad baja de que se superen los puntos de inflexión climáticos, 1 °C para una probabilidad moderada, etc.) (Tabla 1). (3) El proceso de nominación para la Comisión de la Tierra y sus grupos de trabajo fue un proceso independiente gestionado por Future Earth (Declaración de ética e inclusión). (4) Reportamos la confianza en nuestras evaluaciones de los LST (LST seguros y datos ampliados Tabla 1).

LST seguros

Utilizamos dos grupos principales de enfoques para establecer los LST seguros: un enfoque de "elementos múltiples" y un enfoque de "agregación espacial". Describimos aquí estos métodos en términos generales, con detalles técnicos disponibles en Métodos Suplementarios. El objetivo de estos límites es proteger la estabilidad del sistema Tierra y los sistemas que sustentan la vida del mayor número posible de especies, pero es posible que no protejan a todas las

especies ni a todos los seres humanos en la actualidad, como se explica con más detalle en nuestro análisis de la justicia.

Para el clima y la biosfera, evaluamos los umbrales críticos para una serie de "elementos" relevantes para cada dominio del Sistema Tierra mediante la revisión de la literatura y la modelización.

- Para el clima, basamos nuestros datos en los encontrados en una reciente evaluación de los elementos de inflexión climática¹⁶ combinados con pruebas sobre la función de la biosfera y la criosfera y la variabilidad paleoclimática (Métodos suplementarios).
- Para la integridad funcional, sintetizamos la literatura sobre el área necesaria para asegurar la CNG local, incluyendo la polinización, el control de plagas y enfermedades, la regulación de la calidad del agua, la protección del suelo, la mitigación de riesgos naturales y las experiencias físicas y psicológicas (Métodos Suplementarios).
- En cuanto al área de ecosistema natural, examinamos la CNG del sistema Tierra de reservas de carbono, flujos de agua y hábitat para evitar la extinción de especies (Métodos complementarios).

A partir de estos conjuntos de umbrales, determinamos límites que evitan que se desencadenen elementos de inflexión climática o que mantienen múltiples CNG locales o del sistema Tierra con distintos niveles de probabilidad. Para establecer los límites climáticos, también utilizamos los rangos de temperatura de anteriores interglaciares del Cuaternario y los rangos de temperatura que mantienen el funcionamiento de la biosfera y la criosfera (Métodos suplementarios).

Para el agua y los nutrientes, identificamos límites subglobales relevantes para estos sistemas y luego los convertimos en límites globales utilizando modelos o una simple agregación.

- (1) En el caso de los flujos de aguas superficiales, utilizamos un consenso emergente en la bibliografía para establecer los límites de las alteraciones (aumento o disminución) de los flujos de aguas superficiales a escala local que protegen los ecosistemas de agua dulce y las pesquerías (Métodos suplementarios) y lo aplicamos a la superficie terrestre global. Mientras que las alteraciones seguras pueden sumarse a un presupuesto de alteración global, para asegurar la protección de los ecosistemas acuáticos, el LST seguro se aplica e interpreta mejor según el límite subglobal. Para derivar los niveles seguros de los volúmenes de alteración del flujo mensual para toda la superficie terrestre global, analizamos las ejecuciones del modelo de balance hídrico (MBH) acopladas con el conjunto de datos TerraClimate de forzamientos climáticos mensuales (los Métodos Suplementarios tienen más información).
- (2) En el caso de las aguas freáticas, nuestro enfoque se basa en evitar el descenso de los niveles de los acuíferos locales estableciendo una reducción media anual máxima segura igual a la recarga media anual (Métodos complementarios). Estimamos la recarga y la detracción anual de aguas freáticas para todas las áreas de superficie terrestre utilizando datos de satélite del Experimento de Recuperación de Gravedad y Clima que cubren el periodo de 2003 a 2016, junto con datos del Modelo de Superficie Terrestre L4 v.2.1 de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Asimilación de Datos Terrestres Globales (los Métodos Suplementarios contienen información más detallada).
- (3) Para el nitrógeno, utilizamos tres límites ambientales regionales: perturbación significativa de los ecosistemas de agua dulce (por la escorrentía total de N), de la potabilidad de las aguas freáticas (por la lixiviación de nitratos) y de los ecosistemas terrestres (por la deposición atmosférica de N debida a las emisiones de amoníaco y óxido de nitrógeno) en amplias zonas basadas en los límites críticos de concentración para cada uno de ellos. Nos basamos principalmente en un estudio reciente⁷² que da continuidad a trabajos anteriores^{74,104,105} que ampliaron el

planteamiento de los PB originales^{27,103}. Este estudio utilizó el modelo Modelo Integrado para Evaluar el Medio Ambiente Global (IMAGE por sus siglas en inglés) para derivar límites subglobales para las pérdidas críticas de nitrógeno, los excedentes y las entradas basadas en concentraciones críticas en el aire y el agua y, a continuación, los agregó a los límites globales (los Métodos Suplementarios tienen más información).

- (4) Para el fósforo, nos basamos en trabajos recientes que utilizaban concentraciones críticas derivadas de la bibliografía para evitar la eutrofización por escorrentía de P con el fin de estimar los límites globales para la entrada y el excedente de P extraído basándose en un cálculo del presupuesto global, teniendo en cuenta el reciclaje de P, los excrementos humanos, la retención de suelos y sedimentos y el reequilibrio global de nutrientes^{74,106}.

Nuestro enfoque para los límites seguros de aerosoles no encaja claramente en estas dos categorías porque utilizamos métodos diferentes para los límites subglobal y global. Nuestro límite seguro subglobal utiliza la evaluación LP de los POA que evitan la inclinación de los sistemas monzónicos regionales. Nuestra evaluación global utiliza literatura reciente sobre las consecuencias de las diferencias interhemisféricas en las concentraciones de aerosoles en el sistema monzónico global (Cuantificación de LST y Métodos Suplementarios tienen más información).

Como referencia para un estado "seguro" del sistema climático de la Tierra, utilizamos la época interglacial del

Sostenemos que sólo dentro de un clima interglacial similar al del Holoceno puede la Tierra seguir soportando el bienestar humano, sujeto a los comportamientos de consumo y al tamaño de la población.

Holoceno (es decir, el estado del sistema Tierra desde la última Edad de Hielo hace unos 11.700 años^{107,108}. El sistema climático global excepcionalmente estable del Holoceno (oscilando <0,5-1 °C con respecto a la temperatura superficial media global preindustrial de 14 °C)¹⁰⁷ y sus configuraciones de hidrología global, producción primaria de biomasa, ciclos biogeoquímicos y CNG del sistema Tierra fueron

los prerequisites fundamentales para el desarrollo humano tal y como lo conocemos⁷. Sostenemos que sólo dentro de un clima interglacial similar al del Holoceno puede la Tierra seguir soportando el bienestar humano, sujeto a los comportamientos de consumo y al tamaño de la población. No hay pruebas de que miles de millones de seres humanos y sociedades complejas puedan prosperar en otros climas conocidos, como una glaciación o una "Tierra invernadero"⁷.

Identificamos los límites en múltiples niveles de probabilidad para reflejar las incertidumbres y variabilidades científicas subyacentes. Estas incertidumbres incluyen la incertidumbre epistémica en el valor límite para un proceso o componente específico del sistema Tierra, como un elemento de inflexión; la variabilidad en un valor límite a través de diferentes lugares; y la incertidumbre al agregar múltiples límites subglobales en un límite global. En algunos casos, estos niveles se presentan con descriptores cualitativos de cada nivel de probabilidad; en otros, se presentan como una estimación central con un rango de incertidumbre, en función de las pruebas disponibles.

Algunas de nuestras cuantificaciones de límites utilizan evaluaciones de elementos de inflexión, ya que su desencadenamiento puede poner en peligro la estabilidad del sistema Tierra. Los elementos de inflexión suelen experimentar cambios abruptos (es decir, más rápidos que el forzamiento), grandes y difíciles de revertir¹⁰⁹, aunque un elemento de inflexión concreto puede no mostrar las tres características simultáneamente (por ejemplo, la tabla 4.10 de la ref. 9). Identificamos los límites basándonos en elementos de inflexión que aceleran o bloquean el cambio en el mismo componente o proceso del Sistema Tierra, como la inflexión climática que acelera un mayor cambio climático o desencadena la pérdida inevitable de una capa de hielo, o que desencadena un elemento de inflexión en otro dominio del Sistema Tierra, como la concentración de fósforo que alcanza un nivel que desencadena la eutrofización y la alteración de los ecosistemas de agua dulce (Tabla 1).

LST seguros: niveles de confianza

También evaluamos los niveles de confianza en nuestros límites seguros (Tabla 1 de datos ampliados). Confianza" en este contexto puede entenderse como "grado de certeza en" o "confianza en la validez de" una cuantificación específica

Algunos LST seguros no son lo suficientemente fuertes como para proteger a los seres humanos y a otras especies en la actualidad y no podemos alcanzar y vivir dentro de los LST seguros si la desigualdad es elevada y los recursos están injustamente distribuidos.

de LST. Utilizamos el mismo esquema para evaluar y comunicar la confianza que el IPCC^{110,111}, que establece dos componentes: (1) la solidez de la base de pruebas, juzgada como limitada, media o sólida, teniendo en cuenta su tipo, cantidad, calidad y coherencia y (2) el grado de acuerdo científico a través

de la literatura revisada por pares y entre los miembros de cada Grupo de Trabajo de la Comisión de la Tierra, juzgado como bajo, medio o alto. Basándose en estas dos dimensiones, pueden utilizarse cinco calificativos para expresar el nivel de confianza en una cuantificación concreta del LST: muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto. Esta autoevaluación es un juicio de expertos basado en nuestra comprensión de la bibliografía disponible.

LST justos (NDS)

Adoptamos una perspectiva de justicia del Sistema Tierra²² tanto por razones intrínsecas como instrumentales.

Demostramos que algunos LST seguros no son lo suficientemente fuertes como para proteger a los seres humanos y a otras especies en la actualidad y que no podemos alcanzar y vivir dentro de los LST seguros si la desigualdad es elevada y los recursos están injustamente distribuidos. Las pruebas de los experimentos de comportamiento en la provisión de bienes públicos muestran que las percepciones de justicia alteran significativamente los resultados de tales experimentos. En particular, los individuos en posiciones desventajosas insisten en la equidad incluso a riesgo de sufrir grandes pérdidas al hacerlo; tales experimentos sugieren que la mitigación del cambio climático puede no lograrse si no se percibe que los países ricos están haciendo su parte^{112,113}. En los experimentos sobre recursos comunes, el aumento de la desigualdad de ingresos conduce a una espiral descendente de sobreexplotación y escasez de recursos¹¹⁴. En tales experimentos, considerar el problema en términos de justicia puede conducir a normas que motiven la restricción de la explotación¹¹⁵. Un análisis de la justicia es tanto más necesario cuanto que toda ciencia surge de los sistemas de valores que se aplican en ese ámbito, aunque a menudo éstos no se hagan transparentes.

En el contexto de nuestro enfoque de justicia del Sistema Tierra²², utilizamos tres criterios de justicia o las "3Is": justicia interespecies y estabilidad del Sistema Tierra (I1)¹⁷, justicia intergeneracional¹⁸ (I2) y justicia intrageneracional (I3). Nuestra investigación sobre la justicia interespecies y multiespecies revela detalles sobre los enfoques académicos de estos conceptos, pero no ha habido intentos de operacionalizarlos deductivamente. En nuestra investigación, hemos combinado la justicia entre especies con la estabilidad del Sistema Tierra, porque la inestabilidad del Sistema Tierra socava a las especies no humanas, y hemos identificado de forma inductiva, a través de enfoques de dominios específicos (por ejemplo, clima, biosfera y carga de aerosoles), límites basados en la erudición existente y en la lógica de ese dominio. La justicia intergeneracional se refiere a la justicia entre las generaciones pasadas y presentes (I2a) y entre las generaciones presentes y futuras (I2b). En general, aunque no siempre, nuestras LST cumplen los criterios I2b porque protegen a las generaciones futuras pero no a las presentes (I2a). La justicia intrageneracional (I3) combina la justicia entre países¹⁹, comunidades e individuos a través de una lente interseccional²⁰. Al establecer un equilibrio entre los distintos criterios de justicia, reconocemos que la protección de las generaciones futuras puede imponer muchas compensaciones con el uso de los recursos actuales y que el fomento de la justicia intrageneracional también planteará cuestiones difíciles sobre cómo compartir los recursos, los riesgos y las responsabilidades.

Nuestro concepto de daño procede de la literatura sobre justicia y conecta con los términos impacto y riesgo utilizados en la literatura sobre evaluación. Por ejemplo, el IPCC define¹¹⁶ el riesgo como el potencial de consecuencias adversas para los sistemas humanos o ecológicos, incluidas las vidas; los medios de subsistencia; la salud y el bienestar; los activos económicos, sociales y culturales; las infraestructuras; los servicios; y los ecosistemas. Estos riesgos son el resultado de la exposición (la presencia de personas u otros bienes en regiones de cambios o amenazas del Sistema Tierra, como las poblaciones que viven cerca del nivel del mar) y de la vulnerabilidad (la propensión o dispositiva a verse afectados negativamente, como los pobres que viven en hogares o estados de salud precarios). El IPCC define el impacto como el riesgo realizado o las consecuencias. Nuestras estimaciones de daños se basan sobre todo en la exposición a distintos niveles de cambio del Sistema Tierra.

Reconocemos cuatro advertencias en el enfoque de justicia aplicado en este documento. (1) Aunque mantenerse dentro de los límites justos establecidos en este documento es crucial para evitar daños a sectores significativos de la población humana, éstos no garantizan en modo alguno resultados justos. Dado que los fines justos pueden alcanzarse con medios injustos, el cumplimiento de estos límites sin transformación podría perjudicar considerablemente a las generaciones actuales. (2) Aunque el daño a los seres humanos está causado en parte por una mayor exposición a los cambios biofísicos, reconocemos que el daño también está en función de la vulnerabilidad socioeconómica de las personas y de su falta de capacidad de adaptación. Esto queda fuera del alcance del presente documento. (3) Nuestros altos niveles de agregación impiden un análisis sistemático de las cuestiones de justicia distributiva en términos de qué subgrupos sociales se ven más perjudicados y en qué escenarios. (4) No abordamos explícitamente las posibles compensaciones entre los tres criterios de justicia. Por ejemplo, los instrumentos políticos para lograr el "I1" bien podrían socavar el "I3" (por ejemplo, limitar el acceso a los recursos de las personas marginales). De aquí que abogamos por la redistribución, la responsabilidad y la compensación.

Cada uno de los LST seguros se ha tratado de forma ligeramente distinta: en algunos ámbitos se analiza cuándo el sistema cruza los puntos de inflexión (por ejemplo, el cambio climático), en otros se argumenta que los puntos de inflexión se cruzaron en el pasado y se intenta recrear límites que permitan el funcionamiento de las especies y los sistemas (por ejemplo, las aguas superficiales) y en otros se tienen en cuenta las limitaciones existentes al hacerlo (por ejemplo, las aguas freáticas). Aunque las propuestas de un enfoque seguro (e I1) cumplen I2b en el sentido de que dejan espacio para las generaciones futuras de seres humanos, puede que no garanticen la seguridad para los seres humanos de hoy (I2a; por ejemplo, el cambio climático; de aquí que pidamos objetivos más estrictos), no abordan la exposición humana local a los contaminantes (por ejemplo, la contaminación atmosférica; de aquí que complementemos con normas locales) o pueden limitar el acceso a los recursos (de aquí que pidamos redistribución²⁶, responsabilidad, compensación, etc.). Por último, mientras que la I2a tiene una dimensión temporal explícita, la justicia intrageneracional tiene una dimensión espacial explícita y se centra en si todas las personas tienen acceso a unos recursos y servicios mínimos²⁶; cómo se dividen o comparten los escasos recursos entre países, comunidades y personas y las diversas cuestiones de justicia que surgen por ámbito; cómo se extienden los riesgos medioambientales por todo el mundo y quién está más expuesto (mediante, por ejemplo, la cartografía de la exposición y la vulnerabilidad) y cómo se reparten las responsabilidades entre los distintos agentes.

Para calcular la población expuesta a distintos niveles de cambio climático (Fig. 2), nos basamos en la bibliografía sobre la exposición a la subida del nivel del mar con distintos niveles de calentamiento, así como en nuestros propios cálculos sobre el calor extremo basados en los resultados de modelos globales. Reconocemos que éstos incluyen un número limitado de los posibles impactos del cambio climático.

- (1) Las proyecciones de la subida del nivel del mar deben tener en cuenta procesos dinámicos de diferente complejidad y a diversas escalas espaciotemporales. En particular, la respuesta inmediata al calentamiento global de varios factores que contribuyen a la subida del nivel del mar (como las capas de hielo y los glaciares continentales) es sólo marginal debido a su gran inercia, pero puede ser de órdenes de magnitud superiores en escalas temporales centenarias. Por lo tanto, para establecer una conexión significativa entre los niveles de temperatura seleccionados y el aumento del nivel del mar desencadenado, la literatura reciente^{117,118} ha recurrido a un doble enfoque. El aumento transitorio del nivel del mar a lo largo del siglo XXI se evalúa agrupando los escenarios del Sendero Socioeconómico Compartido y del Sendero de Concentración Representativa según su temperatura de estabilización a finales de siglo. Esas agrupaciones (por ejemplo, todos los escenarios que terminan en $2 \pm 0,25$ °C) se utilizan para impulsar modelos localizados de subida del nivel del mar, lo que da lugar a estimaciones de la subida del nivel del mar en 2100 para distintos niveles de estabilización del calentamiento a finales de siglo^{117,119}. Además, estas proyecciones para el siglo XXI pueden complementarse con estimaciones multicentenarias, ya que el aumento del nivel del mar a largo plazo se rige por los equilibrios de los elementos de la criosfera y la expansión térmica de los océanos¹²⁰. A continuación, la evaluación de la exposición en estas diferentes escalas temporales requeriría proyecciones de población, disponibles para el siglo XXI pero inútiles para escalas temporales más largas. En aras de la coherencia, nos remitimos a un estudio reciente que cuantifica el número de personas que habitan actualmente (base de referencia de ese documento: población en 2010 de 6.800 millones de personas) en tierras sujetas a inundación a finales de este siglo o en una escala temporal de varios siglos, sin tener en cuenta la posible adaptación mediante la migración, las defensas costeras, etc.¹¹⁷.
- (2) La exposición a la temperatura del bulbo húmedo (TW) se calculó para el periodo histórico 1979-2014 y para el escenario futuro 2-4.5 de la Senda Socioeconómica Compartida para 2015-2100. La temperatura del bulbo húmedo se calculó siguiendo el método de Davies-Jones¹²¹. Se descargaron datos globales de temperatura y humedad relativa en cuadrículas con un espaciado de $1,25^\circ \times 1,25^\circ$ a intervalos de 6 horas de un conjunto de datos globales con corrección de sesgo¹²² basado en 18 modelos de la Fase 6 del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados y el conjunto de datos del Reanálisis 5 del Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Medio Plazo. Se agregaron los datos para crear un conjunto de datos de TW máxima diaria y luego se interpolaron para que coincidieran con el espaciado de cuadrícula de $1^\circ \times 1^\circ$ de los datos espacialmente explícitos para la distribución de la población de 2020 (los más recientes disponibles, total mundial de 7.700 millones de personas) del recuento de población ajustado al WPP de las Naciones Unidas, v.4.11 (ref. ¹²³). A continuación, calculamos la exposición de bulbo húmedo sumando el recuento de población de todas las celdas con al menos 1 día con una TW máxima > 35 °C. El umbral de TW de 35 °C se eligió porque a menudo se considera el límite fisiológico humano de tolerancia al estrés térmico. El cuerpo humano es incapaz de enfriarse más allá de $TW = 35$ °C (ref. ^{124,125}). Por lo tanto, una media de 1 día al año por encima de esta temperatura es un indicador conservador para evaluar la exposición humana al estrés térmico, que no tiene en cuenta la variabilidad anual. A continuación, trazamos el número total de personas expuestas a 1 día con una TW máxima > 35 °C en un año frente al calentamiento global medio anual asociado a ese año para construir una curva de respuesta exposición-temperatura.
- (3) Calculamos el número de personas desplazadas del nicho climático humano⁸ a diferentes niveles de calentamiento, siguiendo el método de Lenton et al.⁴¹. El número de personas expuestas a temperaturas medias anuales superiores a 29 °C se calculó para distintos aumentos de la temperatura media global en cuatro vías socioeconómicas compartidas diferentes. Se utilizó el resultado espacialmente explícito reducido de la fase 6 del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados disponible en la base de datos WorldClim v.2.0 con una resolución de 0,0833° (aproximadamente 10 km) (disponible en <https://worldclim.org>). La población expuesta se basa en una población en 2010 de 6.900 millones de habitantes con una distribución espacial según la base de datos History

Database of the Global Environment 3.2¹²⁶. El umbral de temperatura media anual de 29 °C se eligió porque está por encima de lo que los seres humanos han estado expuestos históricamente⁸.

Para calcular las transgresiones subglobales actuales de la LST (Fig. 3), utilizamos datos para el bulbo húmedo superior y las zonas costeras de baja altitud¹²⁷ como sustitutos de los impactos climáticos, la integridad funcional de la biosfera (Métodos suplementarios), las aguas superficiales y freáticas (Métodos suplementarios), la superación de los excedentes locales justos y seguros de nitrógeno y la concentración de fósforo (Métodos suplementarios) y las concentraciones de PM_{2,5}¹²⁸. Para la población, utilizamos el recuento de población ajustado al WPP de la ONU v.4.11 (ref. ¹²³).

Existen muchas incertidumbres y limitaciones en este análisis de justicia. La falta de datos suficientes sobre seres humanos, comunidades y países de todo el mundo perjudicados por la degradación biofísica es una limitación clave. También existe una incertidumbre considerable en cuanto a los impactos sobre las generaciones actuales, las generaciones futuras y países y comunidades específicos. En este documento tampoco cuantificamos los problemas de acceso²⁶, no exploramos las implicaciones del acceso para un corredor seguro y justo ni analizamos por qué es difícil resolver los problemas de acceso sin transformar nuestros sistemas de gobernanza.

Declaración de ética e inclusión

Los Comisionados de la Tierra fueron seleccionados por el Comité Consultivo de la Tierra Futura tras una convocatoria abierta de candidaturas en la que se tuvo en cuenta el equilibrio de género, región geográfica y experiencia en la medida de lo posible. Los miembros de los grupos de trabajo fueron seleccionados por los codirectores de los grupos de trabajo tras una convocatoria abierta y aprobados por la Comisión de la Tierra, prestando atención al equilibrio de género, región geográfica y experiencia en la medida de lo posible.

Resumen del informe

Para más información sobre el diseño de la investigación, consulte el resumen de informes del Portafolio de Naturaleza enlazado a este artículo.

Disponibilidad de los datos

Los datos de las Figs. 2 y 3 están disponibles en <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.22047263.v2> y <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.20079200.v2>, respectivamente. Nos basamos en otros conjuntos de datos publicados para el límite climático¹⁶, el límite de N₇₂ (los archivos del modelo están en <https://doi.org/10.5281/zenodo.6395016>), el fósforo^{73,74} (los desgloses de los escenarios están en <https://ora.ox.ac.uk/objects/uuid:d9676f6b-abba-48fd-8d94-cc8c0dc546a2>, y un resumen de los indicadores de sostenibilidad agrícola está en <https://doi.org/10.5281/zenodo.5234594>), los excedentes actuales de N^{129,130} (el repositorio en <https://dataportal.pbl.nl/downloads/IMAGE/GNM>) con el límite crítico de excedente de N₇₂ sustraído, y la concentración subglobal estimada de P en la escorrentía basada en la carga estimada de P en el agua dulce¹³¹ y los datos locales de escorrentía^{132,133}. La integridad funcional actual se calcula a partir del mapa de ocupación del suelo WorldCover de 10 metros de resolución de la Agencia Espacial Europea (<https://esa-worldcover.org/en>). El límite de seguridad y el estado actual de las aguas freáticas se obtienen a partir del experimento Gravity Recovery And Climate Experiment (http://www2.csr.utexas.edu/grace/RL06_mascons.html) y del Global Land Data Assimilation System (https://disc.gsfc.nasa.gov/datacollection/GLDAS_NOAH025_3H_2.1.html). Encontrará más información en "Disponibilidad del código" y en Métodos suplementarios. Los datos fuente de la Fig. 2 se facilitan con este documento.

Disponibilidad del código

El código utilizado para producir las Figs. 2 y 3 está disponible en <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.22047263.v2> y <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.20079200.v2>, respectivamente. El código utilizado para hacer las capas límite del Sistema Tierra de nutrientes en la Fig. 3 está disponible en <https://doi.org/10.5281/zenodo.7636716>. El código utilizado para hacer la capa de agua superficial en la Fig. 3 y derivar los límites del sistema Tierra subglobal para el agua superficial está disponible en <https://doi.org/10.5281/zenodo.7674802>. El código para estimar la integridad funcional actual está disponible en https://figshare.com/articles/software/integrity_analysis/22232749/2. El código para derivar la capa de aguas freáticas de la Fig. 3 y derivar la recarga anual total de aguas freáticas está disponible en <https://doi.org/10.5281/zenodo.7710540>.

Referencias:

1. IPBES. Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Zenodo <https://doi.org/10.5281/zenodo.5657041> (2019).
2. Folke, C. et al. Our future in the Anthropocene biosphere. *Ambio* 50, 834–869 (2021).
3. IPCC Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (eds Pörtner, H.-O. et al.) (Cambridge Univ. Press, 2022).
4. Rockström, J. et al. Identifying a safe and just corridor for people and the planet. *Earth's Future* 9, e2020EF001866 (2021).
5. Rockström, J. et al. Stockholm to Stockholm: achieving a safe Earth requires goals that incorporate a just approach. *One Earth* 4, 1209–1211 (2021).
6. Zalasiewicz, J. et al. The Working Group on the Anthropocene: summary of evidence and interim recommendations. *Anthropocene* 19, 55–60 (2017).
7. Steffen, W. et al. Trajectories of the Earth system in the Anthropocene. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 115, 8252–8259 (2018).
8. Xu, C., Kohler, T. A., Lenton, T. M., Svenning, J.-C. & Scheffer, M. Future of the human climate niche. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 117, 11350–11355 (2020).
9. IPCC Climate Change 2021: The Physical Science Basis (eds Masson-Delmotte, V. et al.) (Cambridge Univ. Press, 2021).
10. UNEP Global Environment Outlook—GEO-6: Healthy Planet, Healthy People (Cambridge Univ. Press, 2019); <https://doi.org/10.1017/9781108627146>.
11. Lenton, T. M. et al. Climate tipping points—too risky to bet against. *Nature* 575, 592–595 (2019).
12. UNEP Global Environment Outlook—GEO-6: Technical Summary (Cambridge Univ. Press, 2021); <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/32024>.
13. Biermann, F., Dirth, E. & Kalfagianni, A. Planetary justice as a challenge for earth system governance: editorial. *Earth System Governance* 6, 100085 (2020).
14. Nakicenovic, N., Rockström, J., Gaffney, O. & Zimm, C. Global Commons in the Anthropocene: World Development on a Stable and Resilient Planet. IIASA Working Paper (IIASA, 2016); <http://pure.iiasa.ac.at/14003/>.
15. Lenton, T. M. et al. Tipping elements in the Earth's climate system. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 105, 1786–1793 (2008).
16. Armstrong McKay, D. I. et al. Exceeding 1.5 °C global warming could trigger multiple climate tipping points. *Science* 377, eabn7950 (2022).
17. Burke, A. & Fishel, S. in *Non-Human Nature in World Politics: Theory and Practice* (eds Pereira, J. C. & Saramago, A.) 33–52 (Springer International Publishing, 2020).
18. Meyer, L. Intergenerational justice. In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (ed. Zalta, E. N.) (Stanford, 2021); <https://plato.stanford.edu/archives/sum2021/entries/justice-intergenerational/>.
19. Blake, M. & Smith, P. T. International distributive justice. In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (ed. Zalta, E. N.) (Stanford, 2022); <https://plato.stanford.edu/archives/sum2022/entries/international-justice/>.
20. Norlock, K. Feminist ethics. In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (ed. Zalta, E. N.) (Stanford, 2019); <https://plato.stanford.edu/archives/sum2019/entries/feminism-ethics/>.
21. Gupta, J. et al. Reconciling safe planetary targets and planetary justice: why should social scientists engage with planetary targets? *Earth System Governance* 10, 100122 (2021).
22. Gupta, J. et al. Earth system justice needed to identify and live within Earth system boundaries. *Nat. Sustain.* <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01064-1> (2023).
23. O'Neill, B. et al. in *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability* (eds Pörtner, H.-O. et al.) 2411–2538 (Cambridge Univ. Press, 2022).
24. Gupta, J. & Schmeier, S. Future proofing the principle of no significant harm. *Int. Environ. Agreem.* 20, 731–747 (2020).
25. Spijkers, O. The no significant harm principle and the human right to water. *Int. Environ. Agreem.* 20, 699–712 (2020).
26. Rammelt, C. et al. Impacts of meeting minimum access on critical earth systems amidst the Great Inequality. *Nat. Sustain.* 6, 212–221 (2022).
27. Steffen, W. et al. Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. *Science* 347, 1259855 (2015).
28. Raworth, K. A doughnut for the Anthropocene: humanity's compass in the 21st century. *Lancet Planet Health* 1, e48–e49 (2017).
29. UN GA. Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development General 68. Assembly resolution 70/1 vol. A/RES/70/1 (United Nations, 2015).
30. van Vuuren, D. P. et al. Defining a sustainable development target space for 2030 and 2050. *One Earth* 5, 142–156 (2022).
31. Hickel, J. Is it possible to achieve a good life for all within planetary boundaries? *Third World Q.* 40, 18–35 (2019).
32. O'Neill, D. W., Fanning, A. L., Lamb, W. F. & Steinberger, J. K. A good life for all within planetary boundaries. *Nat. Sustain.* 1, 88–95 (2018).
33. Mace, G. M. et al. Approaches to defining a planetary boundary for biodiversity. *Glob. Environ. Change* 28, 289–297 (2014).

34. Gleeson, T. et al. The water planetary boundary: interrogation and revision. *One Earth* 2, 223–234 (2020).
35. Zipper, S. C. et al. Integrating the water planetary boundary with water management from local to global scales. *Earth's Future* 8, e2019EF001377 (2020).
36. Heistermann, M. HESS opinions: a planetary boundary on freshwater use is misleading. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21, 3455–3461 (2017).
37. Biermann, F. & Kim, R. E. The boundaries of the planetary boundary framework: a critical appraisal of approaches to define a 'safe operating space' for humanity. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 45, 497–521 (2020).
38. Wang-Erlandsson, L. et al. A planetary boundary for green water. *Nat. Rev. Earth Environ.* 3, 380–392 (2022).
39. Rijbsberman, F. R. & Swart, R. J. (eds) *Targets and Indicators of Climate Change. Report of Working Group II of the Advisory Group on Greenhouse Gases* (Stockholm Environmental Institute, 1990).
40. Parmesan, C. et al. in *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability* (eds Pörtner, H.-O. et al.) 197–377 (Cambridge Univ. Press, 2022).
41. Lenton, T. M. et al. Quantifying the human cost of global warming. *Nat. Sustain.* <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01132-6> (2023).
42. Sala, E. et al. Protecting the global ocean for biodiversity, food and climate. *Nature* 592, 397–402 (2021).
43. Fedele, G., Donatti, C. I., Bornacelly, I. & Hole, D. G. Nature-dependent people: mapping human direct use of nature for basic needs across the tropics. *Glob. Environ. Change* 71, 102368 (2021).
44. Vira, B. & Kontoleon, A. in *Biodiversity Conservation and Poverty Alleviation: Exploring the Evidence for a Link* (eds Roe, D. et al.) 52–84 (Wiley, 2012).
45. Alves, R. R. N. & Rosa, I. M. L. Biodiversity, traditional medicine and public health: where do they meet? *J. Ethnobiol. Ethnomed.* 3, 14 (2007).
46. Isbell, F. et al. Linking the influence and dependence of people on biodiversity across scales. *Nature* 546, 65–72 (2017).
47. Ellis, E. C. & Mehrabi, Z. Half Earth: promises, pitfalls, and prospects of dedicating half of Earth's land to conservation. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 38, 22–30 (2019).
48. Garibaldi, L. A. et al. Working landscapes need at least 20% native habitat. *Conserv. Lett.* 14, e12773 (2020).
49. Rocha, J. C. Ecosystems are showing symptoms of resilience loss. *Environ. Res. Lett.* 17, 065013 (2022).
50. Obura, D. O. et al. Integrate biodiversity targets from local to global levels. *Science* 373, 746–748 (2021).
51. Pascual, U. et al. Biodiversity and the challenge of pluralism. *Nat. Sustain.* 4, 567–572 (2021).
52. Tickner, D. et al. Bending the curve of global freshwater biodiversity loss: an emergency recovery plan. *Bioscience* 70, 330–342 (2020).
53. Reid, A. J. et al. Emerging threats and persistent conservation challenges for freshwater biodiversity. *Biol. Rev. Camb. Philos. Soc.* 94, 849–873 (2019).
54. Dodds, W. K., Perkin, J. S. & Gerken, J. E. Human impact on freshwater ecosystem services: a global perspective. *Environ. Sci. Technol.* 47, 9061–9068 (2013).
55. Funge-Smith, S. & Bennett, A. A fresh look at inland fisheries and their role in food security and livelihoods. *Fish Fish* 20, 1176–1195 (2019).
56. Poff, N. L. et al. The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards. *Freshw. Biol.* 55, 147–170 (2010).
57. Liu, X. et al. Environmental flow requirements largely reshape global surface water scarcity assessment. *Environ. Res. Lett.* 16, 104029 (2021).
58. Hoekstra, A. Y., Mekonnen, M. M., Chapagain, A. K., Mathews, R. E. & Richter, B. D. Global monthly water scarcity: blue water footprints versus blue water availability. *PLoS ONE* 7, e32688 (2012).
59. Richter, B. D., Davis, M. M., Apse, C. & Konrad, C. A presumptive standard for environmental flow protection. *River Res. Appl.* 28, 1312–1321 (2012).
60. Rolls, R. J. & Arthington, A. H. How do low magnitudes of hydrologic alteration impact riverine fish populations and assemblage characteristics? *Ecol. Indic.* 39, 179–188 (2014).
61. Carlisle, D. M., Wolock, D. M. & Meador, M. R. Alteration of streamflow magnitudes and potential ecological consequences: a multiregional assessment. *Front. Ecol. Environ.* 9, 264–270 (2010).
62. Mekonnen, M. M. & Hoekstra, A. Y. Four billion people facing severe water scarcity. *Sci. Adv.* 2, e1500323 (2016).
63. Minderhoud, P. S. J., Middelkoop, H., Erkens, G. & Stouthamer, E. Groundwater extraction may drown mega-delta: projections of extraction-induced subsidence and elevation of the Mekong delta for the 21st century. *Environ. Res. Commun.* 2, 011005 (2020).
64. Kath, J., Boulton, A. J., Harrison, E. T. & Dyer, F. J. A conceptual framework for ecological responses to groundwater regime alteration (FERGRA). *Ecohydrol.* 11, e2010 (2018).
65. Döll, P., Fritsche, M., Eicker, A. & Müller Schmied, H. Seasonal water storage variations as impacted by water abstractions: comparing the output of a global hydrological model with GRACE and GPS observations. *Surv. Geophys.* 35, 1311–1331 (2014).
66. Scanlon, B. R. et al. Groundwater depletion and sustainability of irrigation in the US High Plains and Central Valley. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 109, 9320–9325 (2012).
67. Prüss-Ustün, A. et al. Burden of disease from inadequate water, sanitation and hygiene for selected adverse health outcomes: an updated analysis with a focus on low- and middle-income countries. *Int. J. Hyg. Environ. Health* 222, 765–777 (2019).
68. UNESCO WWAP The United Nations World Water Development Report 3: Water in a Changing World (UNESCO and Earthscan, 2009); <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000181993>.
69. WHO Guidelines for Drinking-water Quality 4th edn (World Health Organization, 2022); <https://www.who.int/publications/i/item/9789240045064>.
70. Rockström, J., Lannerstad, M. & Falkenmark, M. Assessing the water challenge of a new green revolution in developing countries. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 104, 6253–6260 (2007).
71. Aldaya, M. M., Allan, J. A. & Hoekstra, A. Y. Strategic importance of green water in international crop trade. *Ecol. Econ.* 69, 887–894 (2010).
72. Schulte-Uebbing, L. F., Beusen, A. H. W., Bouwman, A. F. & de Vries, W. From planetary to regional boundaries for agricultural nitrogen pollution. *Nature* 610, 507–512 (2022).
73. Zhang, X. et al. Quantitative assessment of agricultural sustainability reveals divergent priorities among nations. *One Earth* 4, 1262–1277 (2021).
74. Springmann, M. et al. Options for keeping the food system within environmental limits. *Nature* 562, 519–525 (2018).
75. Zhang, X. et al. Quantifying nutrient budgets for sustainable nutrient management. *Glob. Biogeochem. Cycles* 34, e2018GB006060 (2020).
76. Cordell, D. & White, S. Life's bottleneck: sustaining the world's phosphorus for a food secure future. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 39, 161–188 (2014).
77. Gu, B. et al. Abating ammonia is more cost-effective than nitrogen oxides for mitigating PM2.5 air pollution. *Science* 374, 758–762 (2021).

78. Ward, M. H. et al. Drinking water nitrate and human health: an updated review. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 15, 1557 (2018).
79. Tirado, R. & Allsopp, M. Phosphorus in Agriculture: Problems and Solutions. Technical report (review) (Greenpeace, 2012); <https://www.greenpeace.to/greenpeace/wp-content/uploads/2012/06/tirado-and-allsopp-2012-phosphorus-in-agriculture-technical-report-02-2012.pdf>.
80. Haywood, J. M., Jones, A., Bellouin, N. & Stephenson, D. Asymmetric forcing from stratospheric aerosols impacts Sahelian rainfall. *Nat. Clim. Change* 3, 660–665 (2013).
81. Krishnamohan, K. S. & Bala, G. Sensitivity of tropical monsoon precipitation to the latitude of stratospheric aerosol injections. *Clim. Dyn.* 59, 151–168 (2022).
82. Liu, F. et al. Global monsoon precipitation responses to large volcanic eruptions. *Sci. Rep.* 6, 24331 (2016).
83. Zuo, M., Zhou, T. & Man, W. Hydroclimate responses over global monsoon regions following volcanic eruptions at different latitudes. *J. Clim.* 32, 4367–4385 (2019).
84. Douville, H. et al. in *Climate Change 2021: The Physical Science Basis* (eds Masson-Delmotte, V. et al.) 1055–1210 (Cambridge Univ. Press, 2021).
85. Visioni, D. et al. Seasonally modulated stratospheric aerosol geoengineering alters the climate outcomes. *Geophys. Res. Lett.* 47, e2020GL088337 (2020).
86. Zhao, M., Cao, L., Bala, G. & Duan, L. Climate response to latitudinal and altitudinal distribution of stratospheric sulfate aerosols. *J. Geophys. Res.* 126, e2021JD035379 (2021).
87. Vogel, A. et al. Uncertainty in aerosol optical depth from modern aerosol-climate models, reanalyses, and satellite products. *J. Geophys. Res.* 127, e2021JD035483 (2022).
88. WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide (WHO, 2021); <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>.
89. Cohen, A. J. et al. Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. *Lancet* 389, 1907–1918 (2017).
90. EPA. Review of the national ambient air quality standards for particulate matter. Environmental Protection Agency. 40 CFR Part 50. Fed. Regis. Rules Regul. 85, 82684–82748 (2020).
91. European Commission. Air quality standards <https://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm> (2020).
92. Shaddick, G. et al. Data integration for the assessment of population exposure to ambient air pollution for global burden of disease assessment. *Environ. Sci. Technol.* 52, 9069–9078 (2018).
93. Rao, N. D., Kieseewetter, G., Min, J., Pachauri, S. & Wagner, F. Household contributions to and impacts from air pollution in India. *Nat. Sustain.* 4, 859–867 (2021).
94. Rao, S. et al. Future air pollution in the shared socio-economic pathways. *Glob. Environ. Change* 42, 346–358 (2017).
95. van Donkelaar, A., Martin, R. V. & Park, R. J. Estimating ground-level PM_{2.5} using aerosol optical depth determined from satellite remote sensing. *J. Geophys. Res.* 111, D21201 (2006).
96. Gupta, P. et al. Satellite remote sensing of particulate matter and air quality assessment over global cities. *Atmos. Environ.* 40, 5880–5892 (2006).
97. Persson, L. et al. Outside the safe operating space of the planetary boundary for novel entities. *Environ. Sci. Technol.* 56, 1510–1521 (2022).
98. Naidu, R. et al. Chemical pollution: a growing peril and potential catastrophic risk to humanity. *Environ. Int.* 156, 106616 (2021).
99. Bai, X. et al. How to stop cities and companies causing planetary harm. *Nature* 609, 463–466 (2022).
100. Companies taking action. Science Based Targets <https://sciencebasedtargets.org/companies-taking-action> (2022).
101. Technical guidance for step 1: assess and step 2: prioritize. Draft for public comment (September 2022). Science Based Targets Network <https://sciencebasedtargetsnetwork.org/wp-content/uploads/2022/09/Technical-Guidance-for-Step-1-Assess-and-Step-2-Prioritize.pdf> (2022).
102. Resources for public consultation on technical guidance for companies. Science Based Targets Network <https://sciencebasedtargetsnetwork.org/resources/public-consultation-resources/> (2022).
103. Rockström, J. et al. A safe operating space for humanity. *Nature* 461, 472–475 (2009).
104. de Vries, W., Schulte-Uebbing, L., Kros, H., Voogd, J. C. & Louwagie, G. Spatially explicit boundaries for agricultural nitrogen inputs in the European Union to meet air and water quality targets. *Sci. Total Environ.* 786, 147283 (2021).
105. Schulte-Uebbing, L. & de Vries, W. Reconciling food production and environmental boundaries for nitrogen in the European Union. *Sci. Total Environ.* 786, 147427 (2021).
106. Zhang, X. et al. Quantification of global and national nitrogen budgets for crop production. *Nat. Food* 2, 529–540 (2021).
107. Osman, M. B. et al. Globally resolved surface temperatures since the Last Glacial Maximum. *Nature* 599, 239–244 (2021).
108. Kaufman, D. et al. Holocene global mean surface temperature, a multi-method reconstruction approach. *Sci. Data* 7, 201 (2020).
109. Biggs, R. et al. in *Encyclopedia of Theoretical Ecology* (eds Hastings, A. & Gross, L.) 609–617 (Univ. of California Press, 2012).
110. Reisinger, A. et al. The Concept of Risk in the IPCC Sixth Assessment Report: a Summary of Cross-working Group Discussions (IPCC, 2020); https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021/02/Risk-guidance-FINAL_15Feb2021.pdf.
111. Mastrandrea, M. D. et al. Guidance Note for Lead Authors of the IPCC Fifth Assessment Report on Consistent Treatment of Uncertainties (IPCC, 2010); https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2017/08/AR5_Uncertainty_Guidance_Note.pdf.
112. Gampfer, R. Do individuals care about fairness in burden sharing for climate change mitigation? Evidence from a lab experiment. *Clim. Change* 124, 65–77 (2014).
113. Marotzke, J., Semmann, D. & Milinski, M. The economic interaction between climate change mitigation, climate migration and poverty. *Nat. Clim. Change* 10, 518–525 (2020).
114. Owusu, K. A., Kulesz, M. M. & Merico, A. Extraction behaviour and income inequalities resulting from a common pool resource exploitation. *Sustain. Sci. Pract. Policy* 11, 536 (2019).
115. Liebrand, W. B. G., Jansen, R. W. T. L., Rijken, V. M. & Suhre, C. J. M. Might over morality: social values and the perception of other players in experimental games. *J. Exp. Soc. Psychol.* 22, 203–215 (1986).
116. IPCC Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (eds Pörtner, H.-O. et al.) (Cambridge Univ. Press, 2022).
117. Strauss, B. H., Kulp, S. A., Rasmussen, D. J. & Levermann, A. Unprecedented threats to cities from multi-century sea level rise. *Environ. Res. Lett.* 16, 114015 (2021).
118. Fox-Kemper, B. et al. in *Climate Change 2021: The Physical Science Basis* (eds Masson-Delmotte, V. et al.) 1211–1362 (Cambridge Univ. Press, 2021).
119. Rasmussen, D. J. et al. Extreme sea level implications of 1.5 °C, 2.0 °C, and 2.5 °C temperature stabilization targets in the 21st and 22nd centuries. *Environ. Res. Lett.* 13, 034040 (2018).
120. Levermann, A. et al. The multimillennial sea-level commitment of global warming. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 110, 13745–13750 (2013).

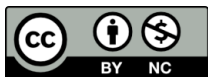
121. Davies-Jones, R. An efficient and accurate method for computing the wet-bulb temperature along pseudoadiabats. *Mon. Weather Rev.* 136, 2764–2785 (2008).
122. Xu, Z., Han, Y., Tam, C.-Y., Yang, Z.-L. & Fu, C. Bias-corrected CMIP6 global dataset for dynamical downscaling of the historical and future climate (1979–2100). *Sci. Data* 8, 293 (2021).
123. CIESIN. Gridded population of the world, version 4 (GPWv4): population count adjusted to match 2015 revision of UN WPP country totals, revision 11. Center for International Earth Science Information Network, Columbia Univ. <https://doi.org/10.7927/H4PN93PB> (2018).
124. Im, E.-S., Pal, J. S. & Eltahir, E. A. B. Deadly heat waves projected in the densely populated agricultural regions of South Asia. *Sci. Adv.* 3, e1603322 (2017).
125. Shaw, R. et al. in *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability* (eds Pörtner, H.-O. et al.) 1457–1579 (Cambridge Univ. Press, 2022).
126. Klein Goldewijk, K., Beusen, A., Doelman, J. & Stehfest, E. Anthropogenic land use estimates for the Holocene–HYDE 3.2. *Earth Syst. Monit.* 9, 927–953 (2017).
127. CIESIN-CIDR. Low elevation coastal zone (LECZ) urban-rural population and land area estimates, version 3. Columbia Univ. and CUNY Institute for Demographic Research, City Univ. of New York <https://doi.org/10.7927/d1x1-d702> (2021).
128. van Donkelaar, A. et al. Monthly global estimates of fine particulate matter and their uncertainty. *Environ. Sci. Technol.* 55, 15287–15300 (2021).
129. Beusen, A. H. W., Van Beek, L. P. H., Bouwman, A. F., Mogollón, J. M. & Middelburg, J. J. Coupling global models for hydrology and nutrient loading to simulate nitrogen and phosphorus retention in surface water—description of IMAGE–GNM and analysis of performance. *Geosci. Model Dev.* 8, 4045–4067 (2015).
130. Beusen, A. H. W. et al. Exploring river nitrogen and phosphorus loading and export to global coastal waters in the shared socio-economic pathways. *Glob. Environ. Change* 72, 102426 (2022).
131. Mekonnen, M. M. & Hoekstra, A. Y. Global anthropogenic phosphorus loads to freshwater and associated grey water footprints and water pollution levels: a high-resolution global study. *Water Resour. Res.* 54, 345–358 (2018).
132. Fekete, B. M., Vörösmarty, C. J. & Lammers, R. B. Scaling gridded river networks for macroscale hydrology: development, analysis, and control of error. *Water Resour. Res.* 37, 1955–1967 (2001).
133. Wisser, D., Fekete, B. M., Vörösmarty, C. J. & Schumann, A. H. Reconstructing 20th century global hydrography: a contribution to the Global Terrestrial Network Hydrology (GTN-H). *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 14, 1–24 (2010).

Vínculos relacionados:

- La Alianza Global Jus Semper
- Johan Rockström et al: [Identificando un Pasaje Seguro y Justo para las Personas y el Planeta](#)
- Will Steffen, Johan Rockström et al: [Trayectorias del Sistema Tierra en el Antropoceno](#)
- Linn Persson et al: [Fuera del Espacio Operativo Seguro del Límite Planetario para Entidades Noveles](#)
- Patricia Villarrubia-Gómez, Sarah E. Cornell, Joan Fabres: La Contaminación por Plásticos Marinos como Amenaza a los Límites Planetarios
- Rakhyn E Kim: [Domesticando a Gaia 2.0: La Ley del Sistema Tierra en el Antropoceno Roto](#)
- Los Editores de Monthly Review: [Los Informes Filtrados del IPCC](#)

- ❖ **Agradecimientos:** Este trabajo forma parte de la Earth Commission, auspiciada por Future Earth y que es el componente científico de la Global Commons Alliance, un proyecto patrocinado por Rockefeller Philanthropy Advisors, con el apoyo de la Fundación Oak, MAVA, Porticus, la Fundación Gordon y Betty Moore, la Fundación Tiina y Antti Herlin, la Fundación William y Flora Hewlett y el Fondo para el Medio Ambiente Mundial. La Earth Commission también cuenta con el apoyo de la Global Challenges Foundation y la Frontiers Research Foundation. Los investigadores individuales recibieron apoyo del European Research Council (Grant on Climate Change and Fossil Fuel 101020082 a J.G. y Advanced Grant ERC-2016-ADG 743080 a J. Rockström), las Open Society Foundations (J.F.A. y T.M.L.), el Gobierno de Australia (Australian Research Council Future Fellowship FT200100381 a S.J.L. y Australian Research Council Discovery Early Career Researcher Award DE230101327 a C.N.) y el Swedish Research Council Formas (Grant 2020-00371 a S.J.L.).
- ❖ **Financiación:** Financiación de acceso abierto proporcionada por la Universidad de Estocolmo.
- ❖ **Autores y afiliaciones:**
- ❖ **Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK), Member of the Leibniz Association, Potsdam, Alemania**
Johan Rockström, Lauren S. Andersen, Sina Loriani, Boris Sakschewski & Ricarda Winkelmann
- ❖ **Institute of Environmental Science and Geography, University of Potsdam, Potsdam, Alemania**
Johan Rockström
- ❖ **Stockholm Resilience Centre, Stockholm University, Stockholm, Suecia**
Johan Rockström, Steven J. Lade, David I. Armstrong McKay, Daniel Ciobanu & Juan Rocha
- ❖ **Amsterdam Institute for Social Science Research, University of Amsterdam, Amsterdam, Países Bajos**
Joyeeta Gupta, Klaudia Prodan, Crellis Rammelt & Joeri Scholtens
- ❖ **IHE Delft Institute for Water Education, Delft, Países Bajos**
Joyeeta Gupta
- ❖ **State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, China**
Dahe Qin & Cunde Xiao
- ❖ **China Meteorological Administration, Beijing, China**
Dahe Qin & Xinwu Xu
- ❖ **University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, China**
Dahe Qin & Xinwu Xu
- ❖ **Future Earth Secretariat, Stockholm, Suecia**
Steven J. Lade, Daniel Ospina, Wendy Broadgate, Lisa Jacobson, Simona Pedde & Juan Rocha
- ❖ **Fenner School of Environment & Society, Australian National University, Canberra, Australia**
Steven J. Lade & Xuemei Bai
- ❖ **Global Systems Institute, University of Exeter, Exeter, Reino Unido**
Jesse F. Abrams, David I. Armstrong McKay & Timothy M. Lenton
- ❖ **Georesilience Analytics, Leatherhead, Reino Unido**
David I. Armstrong McKay
- ❖ **Center for Atmospheric and Oceanic Sciences, Indian Institute of Science, Bengaluru, India**
Govindasamy Bala
- ❖ **Australian Rivers Institute, Griffith University, Brisbane, Australia**
Stuart E. Bunn, Syezlin Hasan, Ben Stewart-Koster & Christopher Ndehedehe
- ❖ **EAT, Oslo, Noruega**
Fabrice DeClerck
- ❖ **Alliance of Bioversity International and CIAT of the CGIAR, Montpellier, Francia**
Fabrice DeClerck
- ❖ **Center for Health & the Global Environment, University of Washington, Seattle, WA, EUA**
Kristie Ebi
- ❖ **School of Geography, Development and Environment, University of Arizona, Tucson, AZ, EUA**
Lauren Gifford & Diana M. Liverman
- ❖ **Institute for Environment and Sanitation Studies, University of Ghana, Legon, Ghana**
Christopher Gordon
- ❖ **Graduate School of Media and Governance, Keio University, Fujisawa, Japón**
Norichika Kanie
- ❖ **Functional Forest Ecology, Universität Hamburg, Barsbüttel, Alemania**
Awaz Mohamed
- ❖ **International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria**
Nebojsa Nakicenovic & Caroline Zimm
- ❖ **CORDIO East Africa, Mombasa, Kenia**
David Obura
- ❖ **Interdisciplinary Center for Water Research, Indian Institute of Science, Bengaluru, India**
Thejina Tharammal
- ❖ **Copernicus Institute of Sustainable Development, Utrecht University, Utrecht, Países Bajos**
Dettef van Vuuren & Lena Schulte-Uebbing
- ❖ **PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, The Hague, Países Bajos**
Dettef van Vuuren
- ❖ **Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, Birmensdorf, Suiza**
Peter H. Verburg
- ❖ **Institute for Environmental Studies, Vrije Universiteit Amsterdam, Amsterdam, Países Bajos**
Peter H. Verburg
- ❖ **Institute of Physics and Astronomy, University of Potsdam, Potsdam, Alemania**
Ricarda Winkelmann
- ❖ **Bieler School of Environment, McGill University, Montreal, Canadá**
Elena M. Bennett
- ❖ **Department of Natural Resource Sciences, McGill University, Montreal, Canadá**
Elena M. Bennett
- ❖ **Center for Environmental Systems Research, Kassel University, Kassel, Alemania**
Stefan Bringezu
- ❖ **Environmental Sciences Initiative, Advanced Science Research Center at the Graduate Center, City University of New York, New York, NY, EUA**
Pamela A. Green
- ❖ **National Climate Center, Beijing, China**
Lei Huang
- ❖ **School of Environment & Science, Griffith University, Nathan, Australia**
Christopher Ndehedehe
- ❖ **Soil Geography and Landscape Group, Wageningen University & Research, Wageningen, Países Bajos**
Simona Pedde
- ❖ **Department of Environmental Sciences, Wageningen University & Research, Wageningen, Países Bajos**
Marten Scheffer
- ❖ **Environmental Systems Analysis Group, Wageningen University & Research, Wageningen, Países Bajos**
Lena Schulte-Uebbing & Wirm de Vries
- ❖ **State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing, China**
Cunde Xiao
- ❖ **School of Life Sciences, Nanjing University, Nanjing, China**
Chi Xu
- ❖ **Centro Vasco de Cambio Climático bc3, Campus Científico de la Universidad del País Vasco, Vizcaya, España**
Noelia Zafra-Calvo
- ❖ **Appalachian Laboratory, University of Maryland Center for Environmental Science, Frostburg, MD, EUA**
Xin Zhang

- ❖ **Acerca de Jus Semper:** La Alianza Global Jus Semper aspira a contribuir a alcanzar un ethos sostenible de justicia social en el mundo, donde todas las comunidades vivan en ámbitos verdaderamente democráticos que brinden el pleno disfrute de los derechos humanos y de normas de vida sostenibles conforme a la dignidad humana. Para ello, coadyuva a la liberalización de las instituciones democráticas de la sociedad que han sido secuestradas por los dueños del mercado. Con ese propósito, se dedica a la investigación y análisis para provocar la toma de conciencia y el pensamiento crítico que generen las ideas para la visión transformadora que dé forma al paradigma verdaderamente democrático y sostenible de la Gente y el Planeta y NO del mercado.
- ❖ **Autores:** Johan Rockström, Joyeeta Gupta, Dahe Qin, Steven J. Lade, Jesse F. Abrams, Lauren S. Andersen, David I. Armstrong McKay, Xuemei Bai, Govindasamy Bala, Stuart E. Bunn, Daniel Ciobanu, Fabrice DeClerck, Kristie Ebi, Lauren Gifford, Christopher Gordon, Syezlin Hasan, Norichika Kanie, Timothy M. Lenton, Sina Loriani, Diana M. Liverman, Awaz Mohamed, Nebojsa Nakicenovic, David Obura, Daniel Ospina, Klaudia Prodani, Crelis Rammelt, Boris Sakschewski, Joeri Scholtens, Ben Stewart-Koster, Thejna Tharammal, Detlef van Vuuren, Peter H. Verburg, Ricarda Winkelmann, Caroline Zimm, Elena M. Bennett, Stefan Bringezu, Wendy Broadgate, Pamela A. Green, Lei Huang, Lisa Jacobson, Christopher Ndehedehe, Simona Pedde, Juan Rocha, Marten Scheffer, Lena Schulte-Uebbing, Wim de Vries, Cunde Xiao, Chi Xu, Xinwu Xu, Noelia Zafra-Calvo & Xin Zhang
- ❖ **Acerca de este trabajo:** Este trabajo fue publicado originalmente en inglés por Nature 619, 102-111 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06083-8>. Este artículo está bajo una Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional, que permite su uso, compartición, adaptación, distribución y reproducción en cualquier medio o formato, siempre que se cite debidamente al autor o autores originales y la fuente, se facilite un enlace a la licencia Creative Commons y se indique si se han realizado cambios. Las imágenes u otro material de terceros en este artículo están incluidos en la licencia Creative Commons del artículo, a menos que se indique lo contrario en una línea de crédito al material. Si el material no está incluido en la licencia Creative Commons del artículo y su uso previsto no está permitido por la normativa legal o excede el uso permitido, se deberá obtener permiso directamente del titular de los derechos de autor. Para ver una copia de esta licencia, visite <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>.
- ❖ **Contribuciones:** J. Rockström, J.G., D.Q., X.B., G.B., S.E.B., F.D., K.E., C.G., N.K., T.M.L., D.M.L., N.N., D. Obura, D.v.V., P.H.V. y R.W. conceptualizaron el trabajo. J.F.A., L.S.A., D.I.A.M., D.C., L.G., S.H., T.M.L., S.L., A.M., D. Ospina, K.P., C.R., B.S., J.S., B.S.-K., T.T., C.Z., E.M.B., S.B., W.B., P.G., L.H., L.J., C.N., S.P., J. Rocha, M.S., L.S.-U., W.d.V., C. Xiao, C. Xu, X.X., N.Z.-C. y X.Z. recopilaron y analizaron los datos. J. Rockström, J.G., D.Q., S.J.L., X.B., G.B., S.E.B., F.D., K.E., C.G., N.K., T.M.L., D.M.L., N.N., D. Obura, D.v.V., P.H.V., R.W., J.F.A., L.S.A., D.I.A.M., D.C., L.G., S.H., S.L., A.M., D. Ospina, K.P., C.R., B.S., J.S., B.S.-K., T.T., C.Z., E.M.B., P.G., C.N., L.S.-U., W.d.V. y X.Z. redactaron el artículo. S.J.L. coordinó la redacción.
- ❖ **Correspondencia con los autores:** Correspondencia a Johan Rockström o Steven J. Lade. **Declaraciones éticas: Intereses en conflicto:** Los autores declaran no tener intereses en conflicto. **Información sobre la revisión por pares:** Nature agradece a Stephen Humphreys, Thomas Nesme, Henrique Pereira y otros revisores anónimos su contribución a la revisión de este trabajo. Los informes de los revisores están disponibles.
- ❖ **Información adicional:** Nota del editor Springer: Nature se mantiene neutral con respecto a las reclamaciones jurisdiccionales en los mapas publicados y las afiliaciones institucionales. **Figuras y tablas de datos ampliados: Datos ampliados Fig. 1 Visualizaciones alternativas de los límites seguros y justos del Sistema Tierra (Fig. 1).** Visualizaciones concéntricas (a) y paralelas (b) de los LST seguros y justos globales (a, círculo interior; b, círculo izquierdo) y subglobales (a, círculo exterior; b, círculo derecho). Los colores son los de la Fig. 1. Los anillos globales (a, círculo interior; b, círculo izquierdo) muestran los estados globales actuales; no se puede definir un único estado actual subglobal. Las líneas concéntricas cortas (que se extienden por menos de la anchura total de una cuña) representan niveles de probabilidad alternativos (seguros) o niveles de exposición (sólo NDS) (Tabla 1). **Datos ampliados Tabla 1: Evaluación de los niveles de confianza en los límites seguros del Sistema Tierra de cada dominio. Información suplementaria: Métodos suplementarios, Figs. 1-3 y Tablas 1-11. Resumen de informes, Archivo de revisión por pares. Fuente de datos Fig. 2**
- ❖ **Cite este trabajo como:** Johan Rockström et al: Los Límites Seguros y Justos del Sistema Tierra — La Alianza Global Jus Semper Global, abril 2024.
- ❖ **Etiquetas:** capitalismo, democracia, límites y resiliencia del Sistema Tierra, bienestar humano, antropoceno, consumo, puntos de inflexión.
- ❖ La responsabilidad por las opiniones expresadas en los trabajos firmados descansa exclusivamente en su(s) autor(es), y su publicación no representa un respaldo por parte de La Alianza Global Jus Semper a dichas opiniones.



Bajo licencia de Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional.
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es>

© 2024. La Alianza Global Jus Semper
 Portal en red: https://www.jussemper.org/Inicio/Index_castellano.html
 Correo-e: informa@jussemper.org