
LA INTERFAZ ENTRE LA BIOSFERA
Y LA NOOSFERA:
PENSAR LAS ESFERAS DE LA
SOSTENIBILIDAD EN LA ERA
DEL ANTROPOCENO

IGNACIO AYESTARÁN¹

ABSTRACT. The fate of humanity in the biosphere dominates the background of our knowledge and existence in the twenty-first century. *Homo sapiens*, as a conscious, self-reflexive and technical being, has produced a new kind of reality on our planet: the *noosphere*. The noosphere was described collectively by Vladimir I. Vernadsky, Pierre Teilhard de Chardin and Edouard Le Roy in the 1920s as a scientific approach connected to philosophy and anthropology. The noosphere is a product of the biosphere as transformed by human knowledge and action. The interface between the biosphere and the noosphere is the main effort to tackle the global spheres for sustainability, as proposed by Martin O'Connor. By approaching this interface we may understand that we live in the Anthropocene, a new geological epoch or era in earth history. Although global-scale human influence on the environment has been recognized since the 1800s, the term Anthropocene has recently become widely used in the global change research community, especially in the interdisciplinary Earth System Science. This research community is an expression of the noosphere seeking global sustainability.

KEY WORDS. Anthropocene, biosphere, noosphere, sustainability, interface.

1. INTRODUCCIÓN:

APROXIMACIÓN A LA PROBLEMÁTICA DEL CAMBIO GLOBAL

El destino de la humanidad en la biosfera domina el trasfondo de nuestro conocimiento y de nuestra existencia en el siglo XXI a escala global. El *Homo sapiens*, que es a la vez *Homo faber*, en tanto que es un ser consciente, autorreflexivo y técnico, ha producido un nuevo tipo de realidad en nuestro planeta que podemos denominar “noosfera”. La noosfera fue descrita colectivamente por el geoquímico ruso Vladimir I. Vernadsky; el paleontólogo francés Pierre Teilhard de Chardin, y el matemático y filósofo francés Édouard Le Roy en la década de los años veinte, como una aproximación científica conectada a la filosofía y la antropología. La noos-

Departamento de Filosofía, Universidad del País Vasco (UPV/EHU), España.
ignacio_ayestaran@ehu.es

fera es un producto de la biosfera, en tanto que es transformada por la acción y el conocimiento humanos en el proceso de evolución y hominización, que ha llegado a su más alto grado de impacto e influencia en la última centuria. La comprensión adecuada de la interfaz entre la biosfera y la noosfera es uno de los principales objetivos para alcanzar la sostenibilidad o sustentabilidad global, por ejemplo, en el marco propuesto recientemente por Martin O'Connor (O'Connor 2006; Maxim, et al. 2009). El estudio de esa interfaz y de sus interrelaciones complejas es también una innovadora forma de comprender que ya no vivimos en el Holoceno, sino en la era del Antropoceno, una nueva época geológica en la historia de la Tierra, debido al impacto antropogénico en la dinámica planetaria (Crutzen 2002). Aunque desde principios del siglo XIX, tras los efectos de la Revolución Industrial, se ha reconocido la influencia humana en el ambiente global del planeta, el término "Antropoceno" ha sido usado en los últimos años por la comunidad investigadora del cambio global, especialmente en la rama interdisciplinar de la ciencia del sistema Tierra (*Earth System Science*). Esta comunidad, inspirándose en el pensamiento pionero de Vernadsky, ha hecho un llamamiento a pensar los límites planetarios y las cuestiones más llamativas y urgentes del acelerado cambio global (Steffen, et al. 2011). Esta forma de pensar los problemas del cambio global supone una forma nueva de investigar y diseñar el futuro sustentable de la humanidad, más allá de la división disciplinar entre ciencias de la naturaleza y ciencias sociales y humanas, así como una prolongación de la propia noosfera por reflexionar y gestionar la vida humana en la biosfera de nuestro planeta. Si Vernadsky hubiese vivido hoy, habría sin duda aprobado este nuevo tipo de generación de conocimientos y vínculos académicos.

2. EL SURGIMIENTO DE LA NOOSFERA EN LA BIOSFERA A PRINCIPIOS DEL SIGLO XX

En las primeras décadas del siglo XX surgió de manera colectiva la idea de la aparición de una nueva esfera, la noosfera, como una fase de la evolución en la biosfera de la Tierra. El geoquímico ruso Vladimir I. Vernadsky refiere, en su publicación "La biosfera y la noosfera", cómo se concibió este término:

En la conferencia que pronuncié en la Sorbona de París en 1922-23, reconocí los fenómenos geoquímicos como la base de la biosfera. El contenido de parte de esas conferencias se publicó en mi libro *Estudios de geoquímica*, obra que apareció primero en francés, en 1924, y después en traducción rusa, en 1927. El matemático francés Le Roy, un filósofo bergsonian, aceptó como punto de partida el fundamento biogeoquímico de la biosfera, y en sus conferencias pronunciadas en el Collège de France en París introdujo en 1927 el concepto

de la noosfera como fase por la que se encuentra pasando actualmente la biosfera desde el punto de vista geológico. Subrayó que había llegado a tal idea en colaboración con su amigo Teilhard de Chardin, gran geólogo y paleontólogo que actualmente está trabajando en China (Vernadsky 1997b, p. 216).

Édouard Le Roy fue el punto de encuentro entre Vladimir I. Vernadsky y Pierre Teilhard de Chardin, y de hecho fue el primero que habló de la noosfera (Le Roy 1927). A partir del *élan vital* en la evolución creadora de Henri Bergson y del empleo del concepto de biosfera por Vernadsky, tras diversas conversaciones con Teilhard de Chardin, Le Roy concibió la hominización como la transición de la biosfera a la noosfera de forma que el ser humano dejase de ser una excrecencia paradójica o un tipo de anomalía en la evolución. Propuso entonces una doble relación por la que la humanidad se explica por la naturaleza y, recíprocamente, la naturaleza por la humanidad, ya que la 'vitalización' de la materia ha condicionado la hominización y viceversa, pues la hominización también puede ayudarnos a comprender el proceso de 'vitalización' planetaria (Le Roy 1928).

En esta línea de pensamiento coevolutivo, Vernadsky pensó la noosfera a partir de las bases geoquímicas de la biosfera. El concepto de biosfera como "área de la vida" ya había sido introducido en la biología por Jean Baptiste Lamarck (1744-1829), en el París de comienzos del siglo XIX, y en la geología por Eduard Suess (1831-1914), en la Viena de finales del mismo siglo. Vernadsky retoma este término aduciendo que la biosfera se caracteriza por ser el campo de la vida, que incluye la totalidad de la troposfera atmosférica, los océanos y una delgada capa de las zonas continentales, de un espesor de tres o más kilómetros. A partir de ahí se plantea cuál es el impacto de la humanidad en la biosfera planetaria.

Para ello, Vernadsky (1945) se percató de un hecho novedoso. En el siglo XX, el ser humano, por primera vez en la historia de la Tierra, había conocido y abarcado la biosfera en su totalidad, llegando a completar el mapa geográfico del planeta Tierra y a colonizar toda su superficie. "La humanidad se ha convertido en una sola totalidad en la vida de la Tierra" (Vernadsky 1997b, p. 215). No hay lugar alguno en la Tierra donde el hombre no pueda vivir si así lo desea, como lo demostraba, según Vernadsky, la estancia del pueblo ruso en los hielos flotantes del Polo Norte entre 1937 y 1938. Al mismo tiempo, gracias a las poderosas técnicas y a los éxitos del pensamiento científico, de la radio y de la televisión, el ser humano era capaz de dirigirse de forma instantánea a todo aquel a quien desee en cualquier punto del planeta. El transporte aéreo se realizaba a una velocidad de varios cientos de kilómetros por hora, y todavía no había alcanzado su límite máximo, según escribía en 1945.

Por lo que se refiere al advenimiento de la noósfera, vemos en torno a nosotros y en cada una de las etapas los resultados empíricos de ese proceso “incomprensible”. Así por ejemplo, esa rareza mineralógica que es el hierro nativo se produce actualmente por miles de millones de toneladas. El aluminio nativo, que nunca existió antes en nuestro planeta, se produce ahora en cualquier cantidad que se desee. Lo mismo es cierto en lo que se refiere a las innumerables combinaciones químicas artificiales (minerales “culturales” biogénicos) recientemente creadas en nuestro planeta. El número de tales minerales artificiales se encuentra en constante crecimiento. Se incluyen aquí todas las *materias primas estratégicas*. Desde el punto de vista químico, la faz de nuestro planeta, la biosfera, está siendo profundamente transformada por el hombre, tanto de forma consciente como, aun en mayor medida, inconscientemente. La envoltura aérea de la tierra y todas sus aguas naturales están siendo modificadas por el hombre física y químicamente. En el siglo XX, y como resultado del crecimiento de la civilización humana, los mares y las partes de los océanos más cercanas a la tierra firme se han ido transformando de forma cada vez más notoria. Como resultado de todo ello, el hombre debe tomar más y más medidas con el fin de preservar para las generaciones futuras la riqueza de los mares, hasta ahora sin pertenencias a nadie. Junto a ello, el hombre ha ido creando nuevas especies y razas de animales y plantas. Parece que será posible realizar en el futuro los bellos sueños contenidos en los cuentos: el hombre está intentando traspasar los límites de este planeta para entrar en el espacio cósmico, y probablemente lo logrará (Vernadsky 1997b, pp. 216-217).

Según el geoquímico ruso, tomada en su conjunto, la humanidad se está convirtiendo en una poderosa fuerza geológica. Combinando “la terminología de Linneo y de Bergson”, Vernadsky concluye que la especie humana cumple una triple característica: ser *Homo sapiens faber*. Se plantea entonces el problema de la “reconstrucción de la biosfera en interés de la humanidad libre pensadora como totalidad [donde] este nuevo estado de la biosfera, al que nos aproximamos sin darnos cuenta, es la *noósfera*” (Vernadsky 1997b, p. 216).

Para Vernadsky, es nuevo en la historia de la humanidad el que los intereses de las masas, por un lado, y el libre albedrío de los individuos, por otro, determinan el curso vital de la humanidad a escala planetaria. Así, surge la noósfera como una fuerza biogeológica en la Tierra. “La noósfera constituye un nuevo fenómeno geológico en nuestro planeta. En él, y por primera vez, el hombre deviene una *fuerza geológica de enorme magnitud*”. Concebida así, la noósfera es la última de las etapas de la evolución de la biosfera en la historia geológica. Todo ello, a juicio del científico ruso, “es el resultado de la ‘cefalización’, del crecimiento del cerebro humano y del trabajo dirigido por ese cerebro”, es decir, la noósfera es un proceso de cefalización planetaria por la hominización global.

Esta idea de cerebrización o cefalización planetarias la adquiere Vernadsky de J. D. Dana (1813-1895) y de J. Le Conte (1823-1901), ambos

americanos, contemporáneos de Darwin y grandes geólogos (Dana también destacaba en mineralogía y biología), que expusieron, incluso antes de 1859, la generalización empírica de que la evolución de la materia viva avanza en una misma dirección categórica. A ese fenómeno lo llamó Dana "cefalización" y Le Conte "era psicozoica". Se sostiene, desde un punto de vista material(ista), que toda la humanidad junta representa una masa insignificante con relación a la materia del planeta y que su fuerza se deriva no de su materia, sino de su cerebro. "Si el hombre comprende todo esto y no usa su cerebro y su trabajo para autodestruirse, se abre delante de él un inmenso futuro en la historia geológica de la biosfera" (Vernadsky 1945).

En resumen, para Vernadsky existe una capa pensante de materia organizada en crecimiento que altera la superficie terrestre y que asocia con la humanidad y la tecnología. Para identificarla adoptó el término *noosfera*, del griego *noos*, mente o espíritu. Por su parte, Teilhard de Chardin adoptará el mismo término pero con otro uso. Para él, la noosfera era la capa planetaria "humana", una capa "externa a la biosfera y por encima de ella", mientras que para Vernadsky la noosfera hacía referencia a la humanidad y la tecnología como partes integrales de la biosfera planetaria (Margulis y Sagan 1995, pp. 44-45; Sagan 1990, p. 57).

Teilhard de Chardin alude a la formación, a partir de y por encima de la biosfera, de una envoltura planetaria más, la envoltura de sustancia pensante a la que, por comodidad y simetría, le concede el nombre de noosfera. Teilhard de Chardin reconoce tomar de Suess y de Vernadsky el término 'biosfera', que originariamente hacía referencia a la zona terrestre que contiene la vida, mientras que para el jesuita francés significa la propia capa de sustancia vitalizante que envuelve la Tierra, para así concebir la noosfera como la esfera terrestre de la sustancia pensante.

De esta manera, la noosfera es la "Tierra pensante" cuando el planeta adquiere una grado de ultra-cerebrización y un tinte psíquico. La capa pensante de la Tierra, la envoltura neoplanetaria de la noosfera es "estrechamente solidaria de la biosfera, con la que enraíza, y, no obstante, bien separada de ella por un sistema autónomo de circulación, de invasión y, finalmente, de cerebrización". En el curso de un solo siglo, debido al salto industrial de las comunicaciones y de las poblaciones, se pergeña un nuevo acontecimiento, donde la sustancia humana empieza a "planetizarse", es decir, a interiorizarse y a animarse globalmente sobre sí, en expresión de Teilhard de Chardin (1959).

Este proceso de noogénesis surge de la socialización planetaria en tres fenómenos interconectados: memoria colectiva; velocidad del pensamiento, y emergencia de una visión común. La memoria colectiva conserva las experiencias acumuladas y transmite por educación una herencia general de la humanidad. El desarrollo veloz transmite cada vez más rápidamente

el pensamiento, en “una verdadera red nerviosa que envuelve, a partir de ciertos centros definidos, la superficie entera de la Tierra”. Por último, por concurso y concentración cada vez más avanzada de los puntos de vista individuales, emerge una facultad de visión común. En torno a estos tres fenómenos, tangible y materialmente, la envoltura pensante de la Tierra —la noosfera— multiplica sus fibras internas, estrecha sus redes y, simultáneamente, se eleva su psiquismo, por medio de la unificación, la tecnificación y la racionalización creciente de la Tierra humana.

Teilhard de Chardin (1959) se atreve a comparar la noosfera con el cerebro humano a modo de un cerebro planetario o un cerebro de cerebros. Entre el encéfalo humano, con sus billones de células nerviosas entrelazadas, y el aparato pensante social, con sus millones de individuos reflexionando solidariamente, existe una paridad. A escala orgánica, se presenta un cerebro elemental formado de núcleos nerviosos, y a escala planetaria, un cerebro de cerebros. Entre los dos complejos orgánicos existe, sin embargo, una diferencia capital. Mientras que en el cerebro individual el pensamiento emerge sobre un sistema de fibras nerviosas no pensantes, en el caso del cerebro colectivo, por el contrario, cada elemento es en sí mismo un centro autónomo de reflexión.

En su examen del órgano “cerebroide” de la noosfera, Teilhard de Chardin escruta tecnológicamente tanto su estructura como su funcionamiento. En su *tecnontología* se hace patente el empleo de las máquinas que liberan al pensamiento, tanto individual como social, de cuanto pudiera lastrar su ascensión, coadyuvando además a que los elementos reflexivos de la Tierra se anuden sobre sí y se concentren bajo forma de un organismo cada vez más penetrante. Aquí piensa en la extraordinaria red de comunicaciones radiofónicas y televisuales que nos ligan a todos en una especie de co-conciencia “etérea”, una sintonización directa de los cerebros. También tiene en mente las máquinas de cálculo que gracias a señales combinadas, y a razón de varios centenares de millares por segundo, no sólo vienen a aliviar al cerebro humano de un trabajo enojoso y agotador, sino que además aumentan la “velocidad del pensamiento”, suponiendo una revolución en el campo de la investigación. A eso añade capacidades como la del microscopio electrónico, mediante el cual nuestra visión sensorial, principal fuente de nuestras ideas, salta bruscamente de la separación óptica de las células a la contemplación directa de las grandes moléculas.

En su obra *El fenómeno humano*, Teilhard de Chardin propone además un esquema de la forma de representación de la noosfera a partir de la biosfera. Siguiendo a los geólogos, que hacen una representación zonal de nuestro planeta, el científico jesuita admitía la división de las diferentes capas de la Tierra conformando diversas esferas. En primer lugar, situaba la barisfera, metálica y central, rodeada por la litosfera rocosa, envuelta ella misma por las capas fluidas de la hidrosfera y de la atmósfera. A estas

cuatro capas, desde Suess, se le había añadido una “membrana viviente” constituida por la flora y la fauna del globo: la biosfera, el tejido del Árbol de la Vida. Ahora, después de la biosfera, en la historia de nuestro planeta, se había añadido una nueva capa o esfera: la noosfera. Ésta se encuentra “por encima del mundo de las plantas y de los animales; fuera y por encima de la biosfera” (Teilhard de Chardin 1963, pp. 220-221). Empieza así una “Edad nueva” como culminación del proceso de hominización: “La Tierra cambia su piel. Mejor aún, encuentra su alma” (Teilhard de Chardin 1963, p. 221). Esta nueva edad de la irrupción de la noosfera puede recibir diversos apelativos: “Edad de la Industria”, “Edad del Petróleo, de la Electricidad y del Átomo”, “Edad de la Máquina”, “Edad de las grandes colectividades y de la Ciencia” (Teilhard de Chardin 1963, p. 261). En cualquier caso se trata de un cambio de era o edad planetaria.

En verdad que, para un geólogo imaginario que viniera mucho más tarde a inspeccionar nuestro globo fosilizado, la más sorprendente de las revoluciones experimentadas por la Tierra se colocaría sin equívoco al comienzo de este periodo, que se ha llamado de manera tan justa el *Psicozoico*. Y al propio tiempo, para un marciano capaz de analizar tanto psíquica como físicamente las radiaciones siderales, la primera característica de nuestro planeta sería ciertamente la de aparecerle no ya azulado por sus mares, o verdeante por sus bosques, sino fosforescente de pensamiento (Teilhard de Chardin 1963, p. 222).

En definitiva, lo que Vernadsky, Teilhard de Chardin y Le Roy estaban anticipando con su propuesta innovadora de comprensión de la aparición e inclusión de la noosfera en la biosfera era la problemática del cambio global de origen antropogénico, que posteriormente ha sido profundizada y revisada con mayor éxito en ramas del conocimiento como la ciencia del sistema Tierra (*Earth System Science*).

3. LA NOOSFERA Y EL PROGRAMA HILBERTIANO DEL SISTEMA TIERRA

La concepción original de la noosfera hecha por Le Roy, Teilhard de Chardin y Vernadsky a principios del siglo XX ha sido recuperada y empleada como marco de trabajo, a comienzos del siglo XXI, para el paradigma emergente de la ciencia del sistema Tierra —*Earth System Science*— (Crutzen 2002; Ayestarán 2008a; Steffen, et al. 2011). Desde esta metodología, Wolfgang Lucht y Rajendra K. Pachauri (2004) han explorado cómo funciona e interactúa el “componente mental” del sistema Tierra con los sistemas físicos y biológicos del planeta. Ellos han distinguido tres esferas en su análisis: el mundo físico (el campo descrito por la química y la física); el mundo biológico (que contiene el área de la vida o de lo viviente), y el mundo mental (que introduce el elemento de la conciencia). Estas tres esferas ontológicas son productos evolutivos del sistema Tierra,

donde, a través de la coevolución, la esfera biológica emergió a partir de la esfera física, y la esfera mental surgió a su vez de la esfera biológica. Estos autores ilustran el elemento mental a través de un bucle tripartito que refleja el componente mental: GeoScope (la interacción entre la observación y la teoría), GeoGraphy (la reintroducción del conocimiento generalizado en contextos sociales), GeoMind (los aspectos de identidad) y GeoAction (la interrelación entre la gobernanza y la representación). Así investigan el mundo mental como un patrón o modelo circular, subdividido en una tetraarquía de cuatro interfaces (Lucht y Pachauri 2004, p. 348):

- GeoScope hace referencia a la interacción entre la observación y las formalizaciones teóricas de donde surge una descripción del mundo percibido. En este sentido, la observación y los conceptos teóricos son mutuamente interdependientes.
- GeoGraphy está relacionado con el discurso asociado con este conocimiento y su transformación localizada en modelos de pensamientos, prácticas e imágenes locales. Es la práctica cultural de una ciencia que transforma las teorías y las observaciones en dominios de conocimiento más accesibles, por caso. En este proceso son capitales temas relacionados con la complejidad, las escalas y la traducción entre diferentes dominios del lenguaje.
- GeoMind remite a un complejo de cuestiones fundamentales: ¿Quiénes somos? ¿Qué queremos ser? Estas cuestiones están íntimamente ligadas a tópicos relacionados con el lugar y están profundamente imbricadas con la formación y evaluación de la identidad. Tenemos aquí la cuestión adicional: '¿Qué queremos nosotros?' como una guía predominante en nuestro mundo que normalmente no es el resultado de un simple análisis técnico.
- GeoAction está relacionado con las medidas que se toman y que afectan al mundo, por ejemplo, la implementación de políticas o decisiones. Está asociada con temas de gobernanza (*governance*), que da orden a entidades sociales más amplias, y con temas de representación, relativas a diversas formas de legitimación de la acción. Finalmente, en la medida en que la acción altera lo observable y debatible, los efectos de la acción pueden ser observados a través de un proceso geoscópico.

Los propios autores (Lucht y Pachauri 2004) de este análisis de la noosfera remiten a Vernadsky como antecesor directo de su propuesta. Con todo, para entender mejor esta aproximación de Lucht y Pachauri, es necesario retrotraerse al paradigma científico del que parten, que no es otro que el paradigma emergente de la *Earth System Science*. Desde sus inicios este paradigma se propuso consolidar un programa que evaluara sus principales cuestiones metodológicas a fin de concebir de forma global y más

eficiente las alteraciones antropogénicas de la biosfera. Para ello se eligió como referencia inspiradora el programa que propuso en su día el matemático David Hilbert. En el año 1900, dentro de la Conferencia Mundial de Matemáticas en París, Hilbert propuso un monumental programa para evaluar los avances de las matemáticas en el siglo XX. Este programa consistió básicamente en una ecléctica lista de veintitrés problemas que debían ser resueltos por la comunidad científica. De modo similar, la comunidad científica internacional del sistema Tierra ha elaborado su propio programa hilbertiano (Schellnhuber y Sahagian de 2002, p. 21; Clark, Crutzen y Schellnhuber 2004, pp. 8-14; Schellnhuber, Crutzen, Clark y Hunt 2005), con un listado de veintitrés preguntas cruciales que deben abordarse para la sostenibilidad global. Este programa para la comprensión del sistema Tierra surgió tras un congreso organizado en 2001 por GAIM (Schellnhuber y Sahagian 2002) —el laboratorio de ideas transdisciplinario del Programa Internacional Geosfera-Biosfera (en inglés, IGBP: *International Geosphere-Biosphere Programme*). Su propuesta programática se postula como un campo innovador de estudio e investigación para el siglo XXI, por medio de una lista de veintitrés preguntas organizadas en cuatro bloques: cuestiones analíticas; metodológicas; normativas, y estratégicas. Este programa plantea una ciencia de la sostenibilidad global, que evalúe los impactos, límites y conocimientos de la coevolución entre la biosfera y la antroposfera, asumiendo directamente que hemos alterado de forma grave o significativa los ciclos de regulación de la dinámica planetaria y que nos hemos sumergido en la era del Antropoceno, más allá del pretérito Holoceno (Crutzen 2002, Steffen, et al. 2011). El programa propone los siguientes objetivos:

A. Cuestiones analíticas

1. ¿Cuáles son los órganos vitales de la ecosfera desde el punto de vista del funcionamiento y de la evolución?
2. ¿Cuáles son los principales patrones dinámicos, las teleconexiones y los bucles de retroalimentación en la maquinaria planetaria?
3. ¿Cuáles son los elementos críticos (umbrales, cuellos de botella, transiciones) en el sistema Tierra?
4. ¿Cuáles son las escalas temporales y los regímenes característicos de la variabilidad natural del planeta?
5. ¿Cuáles son los regímenes de las perturbaciones antropogénicas y de las teleperturbaciones que importan desde el nivel del sistema Tierra?
6. ¿Cuáles son los órganos vitales de la ecosfera y los elementos planetarios críticos que pueden ser transformados por la acción humana?
7. ¿Cuáles son las regiones más vulnerables en los cambios globales?
8. ¿Cómo son procesados los fenómenos extremos y abruptos a través de las interacciones naturaleza-sociedad?

B. Cuestiones operativas

9. ¿Cuáles son los principios para la construcción de “macroscopios” (*macroscopes*), es decir, representaciones del sistema Tierra que agreguen detalles sin cesar, manteniendo al mismo tiempo todos los ítems de los órdenes sistémicos?
10. ¿Qué niveles de complejidad y resolución tienen que ser alcanzados en los modelos del sistema Tierra?
11. ¿Es posible describir el sistema Tierra como una composición de regiones y órganos débilmente acoplados, y es posible reconstruir la maquinaria planetaria desde estas piezas?
12. ¿Cuál podría ser la estrategia global más eficaz para la generación, transformación e integración de la serie de datos relevantes del sistema Tierra?
13. ¿Cuáles son las mejores técnicas para analizar y, en la medida de lo posible, predecir eventos irregulares?
14. ¿Cuáles son las metodologías más apropiadas para la integración del conocimiento entre las ciencias naturales y las ciencias sociales?

C. Cuestiones normativas

15. ¿Cuáles son los principios y criterios generales para distinguir los futuros sostenibles y no-sostenibles?
16. ¿Cuál es la capacidad de carga de la Tierra?
17. ¿Cuáles son los dominios accesibles pero intolerables en el espacio de la co-evolución entre la naturaleza y la humanidad?
18. ¿Qué tipo de la naturaleza quieren las sociedades modernas?
19. ¿Cuáles son los principios de equidad que deberían gobernar la gestión global del medio ambiente?

D. Cuestiones estratégicas

20. ¿Cuál es la combinación óptima de medidas de adaptación y mitigación para responder al cambio global?
21. ¿Cuál es la óptima descomposición de la superficie del planeta en reservas naturales y áreas gestionadas?
22. ¿Cuáles son las opciones y advertencias ante soluciones tecnológicas como la geoingeniería y la modificación genética?
23. ¿Cuál es la estructura de un sistema eficaz y eficiente para las instituciones ambientales y de desarrollo globales?

Algunas de estas cuestiones del programa hilbertiano de la ciencia del sistema Tierra presentan analogías con otros estudios sobre la construcción de una sociedad sostenible del conocimiento global. En concreto, en este artículo se va a profundizar en la cuestión operativa número 14 (“¿Cuáles son las metodologías más apropiadas para la integración del conocimiento entre las ciencias naturales y las ciencias sociales?”), en la

cuestión normativa número 15 (“¿Cuáles son los principios y criterios generales para distinguir los futuros sostenibles y no sostenibles?”) y en la cuestión estratégica número 23 (“¿Cuál es la estructura de un sistema eficaz y eficiente para las instituciones ambientales y de desarrollo globales?”). Con ello se va a proponer un marco metodológico y cognitivo que agrupe en un mismo conjunto las pretensiones de las ciencias de la naturaleza y de las ciencias sociales y humanas (cuestión operativa 14) dentro de una visión integral de las esferas de la sostenibilidad (cuestión normativa 15) que permita avanzar en el futuro sostenible de la interrelación entre la biosfera y la noosfera a través de diversas interfaces institucionales —economía, sociedad y política— para el desarrollo global (cuestión estratégica 23).

4. LAS CUATRO ESFERAS DE LA SOSTENIBILIDAD Y SUS INTERFACES

Como se puede colegir indirectamente de lo expuesto hasta ahora, la vieja idea de la contraposición entre la biosfera y la noosfera ha sido reabsorbida por los nuevos intereses de las investigaciones sobre el desarrollo sostenible global. En las dos últimas décadas, se han establecido tres esferas necesarias para la metodología del estudio de la sostenibilidad y de su conocimiento: la esfera económica; la esfera social, y la esfera ambiental. Desde esta nueva perspectiva, alcanzar la sostenibilidad presupone una integración de las tres esferas en un marco de triple contabilidad sustentable o *triple bottom line*. Esta triple satisfacción de indicadores del desempeño económico, social y ambiental se presenta como un criterio de calidad complejo y no exento de conflictos e incertidumbres en la gestión de los ecosistemas desde los intereses sociales y económicos. Por ello, algunos autores como Martin O'Connor (O'Connor 2006; Maxim et al. 2009) han propuesto la formulación de una cuarta esfera, la esfera política, que ayude a orquestar los diferentes intereses en juego. El papel de esta esfera es arbitrar los intereses de los diversos actores sociales y económicos con relación a la esfera ambiental. Para ello se consideran varias interfaces entre las cuatro esferas desde los planteamientos de la ciencia de los sistemas y las elecciones sociales implicadas en la toma de decisiones de las disciplinas económicas y políticas. Cada una de las cuatro esferas es analizada desde la organización de los sistemas en una tabla matriz, donde las casillas en diagonal reflejan los conceptos y criterios de desempeño relacionados con una sola forma organizativa y el resto de las casillas indican las interferencias e interacciones entre dos formas organizativas, tal y como se puede colegir del cuadro 1.

Cuadro 1 - LAS CUATRO ESFERAS DE LA SOSTENIBILIDAD Y SUS INTERFACES Fuente: M. O'Connor 2006, p. 287				
Matriz de la sostenibilidad	SOCIAL	ECONÓMICA	AMBIENTAL	POLÍTICA
SOCIAL	ESFERA SOCIAL: Formas de identidad colectiva y comunidad			
ECONÓMICA	OPORTUNIDADES E IMPACTOS: "Economía versus comunidad"	ESFERA ECONÓMICA: Rendimiento, productos y outputs		
AMBIENTAL	VIVIR CON/EN LA NATURALEZA: Significados, valores y riesgos: ¿sostener qué y para quién?	FUNCIONES AMBIENTALES: Presiones sobre el medio y servicios del medio ambiente	ESFERA AMBIENTAL: Energía, materia, ciclos naturales y biodiversidad	
POLÍTICA	POLÍTICA SOCIAL: Capacidad de las comunidades; participación ciudadana/pública	POLÍTICA ECONÓMICA: Formulación de reglas y límites de los mercados	POLÍTICA AMBIENTAL: Regulación de lo que cuenta como un valor ambiental	ESFERA POLÍTICA: Coordinación, poder y gobernanza

La tabla matriz presentada por O'Connor refleja los sistemas implicados en el desarrollo sostenible desde un modelo de cuatro capitales: el económico; el natural; el social, y el humano. Tres de estos capitales son considerados como "fondos" según el lenguaje económico ortodoxo para las tres esferas básicas: en la esfera económica tenemos el capital construido o elaborado; en la esfera ambiental el capital natural (la tierra, el agua y la biosfera), y en la esfera social el capital social considerado como las comunidades y las redes de significado e identidad compartidas. En contraste, el capital humano no está asociado a una esfera en particular, sino que, más bien, es un elemento constituyente de todas las esferas, incluida la esfera política. El capital natural de los ecosistemas, el capital financiero de la esfera económica, el capital social de las organizaciones y el capital humano transversal a todos ellos circulan a través de las diversas interfaces en la gestión de un criterio de "sostenibilidad fuerte" (*strong sustainability*) que asegura la viabilidad y la conveniencia de las acciones del triple desempeño económico, social y ambiental.

Dos ejes escenifican estas interfaces de las cuatro esferas y los diversos capitales mencionados. El primer eje —la viabilidad— es la frontera de las esferas interdependientes de la ecología y de la economía. Este eje es el campo de la ciencia de sistemas y del modelo integrado "economía-ambiente" (aquí se sitúa una amplia gama que va desde la economía ambien-

tal hasta la economía ecológica y la ecología industrial). El segundo eje —la conveniencia— es la frontera compuesta por la interferencia de las esferas política y social. Este eje implica el problema de la “gobernanza” (*governance*) en los ajustes institucionales para la coordinación de los actores en la sociedad con sus preocupaciones e intereses dispares (aquí se localizan ramas tan diversas como el derecho ambiental, la justicia ecológica, la sociología ambiental y la ecología política). A juicio de O’Connor, la caracterización de estas interfaces presenta una ventaja para la complementariedad fundamental entre, de un lado, el análisis de sistemas de las ciencias naturales y, de otro, el análisis de las ciencias humanas y de las redes sociales para la delimitación de lo que es bueno, justo y aceptable, incluyendo además “para quién” y “por qué” establecemos estos criterios.

Desde este modelo de las cuatro esferas de la sostenibilidad fuerte se evocan tres factores que se refuerzan e interfieren mutuamente, siempre teniendo en cuenta la fundamentación científica y las consideraciones sociales en la toma de decisiones. Los tres factores resultantes son los siguientes:

1. El conocimiento científico que asesora sobre las incertidumbres irreductibles y/o irreversibilidades asociadas a los cursos de acción.
2. La pluralidad de sistemas de valores, las convicciones morales y políticas, y los criterios de justificación dentro de la sociedad.
3. Los grados de decisión elevados, incluyendo intereses económicos y preocupaciones de seguridad estratégica (tanto para las naciones como para minorías étnicas, por ejemplo) y también las consecuencias del cambio ambiental para la salud pública, la integridad de los organismos y las posibilidades económicas en el futuro.

El modelo de las cuatro esferas propuesto supone un amplio campo de investigación, desde el análisis científico de la integridad de los sistemas hasta un proceso de deliberación política, a través de diferentes ejes coordinados a lo largo de un dilatado espacio y de un prolongado tiempo, dos requisitos básicos para poder hablar con propiedad de sostenibilidad, además de involucrar a una multitud de grupos partícipes o *stakeholders*. Así, O’Connor estructura y diseña un cuadro metodológico —ver cuadro 2— donde se verifican las diversas interfaces e interacciones entre las cuatro esferas de la sostenibilidad para poder establecer criterios de calidad basados en las diferentes disciplinas científicas implicadas, desde las ciencias de la naturaleza hasta las ciencias sociales y humanas.





Se aprecia en la propuesta metódica del marco de las cuatro esferas de la sostenibilidad un flujo de nodos y redes complejas entre lo económico, lo social, lo ambiental y lo político, inscrito en un cuadro de análisis de sistemas que requiere tanto de metodologías pertenecientes a las ciencias de la naturaleza como a las ciencias humanas y sociales, que además remiten a varios dilemas tanto científicos como políticos a un mismo tiempo. De esta manera, se subrayan dos hechos notorios: 1) las políticas globales de calidad necesitan de la ciencia, y 2) el desarrollo tecnocientífico resulta ciego si no va acompañado de todos los debates sobre valores sociopolíticos y conocimientos plurales en sus diversas interfaces, conexiones y retroalimentaciones. Una primera lección de estos dos hechos es que se requiere un tipo de innovación transdisciplinar en la investigación, que vaya más allá de las fronteras rígidas del mundo académico disciplinar, así como de los compartimentos sociales y políticos al uso.

5. CONCLUSIÓN: LA NECESIDAD DE UN CONOCIMIENTO GLOBAL DE LAS INTERFACES SOSTENIBLES

Hemos llegado a un punto de inflexión en el estudio de la ciencia de nuestro planeta en su conjunto. En el mundo clásico de la Antigüedad, la interrelación entre la ciencia y el planeta se estructuraba entre dos polos opuestos, que a menudo eran antitéticos. Por un lado, la naturaleza (la *physis* griega y la *natura* latino-renacentista) que se contraponía al polo de lo humano o de la sociedad (la *polis* griega o la *civitas* romano-moderna). Este mundo bipolar (naturaleza/sociedad) llegaría hasta el inicio de las grandes ciudades europeas del Renacimiento y la revolución científica de los siglos XVI-XVII. Después de la Revolución Industrial y bien entrado el siglo XX, con la madurez de ciencias como la biología y la ecología, se empezará a buscar una solución científica a los grandes problemas globales de la crisis de la gestión de los ecosistemas. El primer paso se dará entre finales de la década de los años veinte y comienzos de los años cuarenta del pasado siglo, cuando Le Roy, Teilhard de Chardin y Vernadsky empiecen a formular la necesidad de conciliar la esfera del desarrollo de la hominización (la noosfera) con la biosfera (Samson y Pitt 1999). A comienzos del siglo XXI se recoge esta idea del paradigma noosférico "Le Roy-Teilhard de Chardin-Vernadsky" a través del paradigma emergente de la ciencia del sistema Tierra, que postula investigar y estudiar los elementos mentales de la noosfera (GeoScope, GeoGraphy, GeoMind, GeoAction), con la ayuda de las teletecnologías y las nuevas tecnologías de la sociedad de la información y del conocimiento (Lucht y Pachauri 2004). Simultáneamente, desde las ciencias de la complejidad y la ecología económica (O'Connor 2006) se reformula el programa de desarrollo sostenible en la búsqueda de un modelo integrador de la esfera ambiental

(biosfera) con los elementos más activos de la noosfera (esferas económica, social y política). Podemos establecer así un cuadro comparativo de las diferentes interpretaciones de la unión entre las ciencias de la naturaleza y las ciencias sociales-humanas en la búsqueda de un conocimiento global y sostenible —ver cuadro 3. Exceptuando el periodo del mundo antiguo bipolar que se hallaba escindido entre el conocimiento de la naturaleza y el mundo social, a partir de finales del siglo XX se ha buscado una conciliación de los elementos más sobresalientes de las ciencias de la naturaleza con los de las ciencias sociales y humanas. El objetivo es proyectar una investigación integral del sistema Tierra y un desarrollo humano sustentable y compatible con su entorno planetario, porque ya no se puede concebir una civilización sin evaluar los límites de su entorno ecosistémico, social y tecnológico simultáneamente.

Cuadro 3 - INTERFAZ ENTRE LAS CIENCIAS DE LA NATURALEZA Y LAS CIENCIAS SOCIALES-HUMANAS				
Matriz: ciencia/planeta	Mundo antiguo bipolar	Le Roy, Teilhard de Chardin, Vernadsky,	Ciencia del Sistema Tierra	Esferas de la sostenibilidad
Ciencias naturales	Naturaleza (physis, natura)	Biosfera	Sistema Tierra	Esfera ambiental
Ciencias sociales y humanas	Sociedad (polis, civitas)	Noosfera (hominización)	GeoScope GeoGraphy GeoMind GeoAction	Esfera económica Esfera social Esfera política

Las nuevas sociedades del conocimiento, para sostenerse en el tiempo y plantear proyectos sustentables, deben ser concebidas a través de sus interfaces no sólo tecnológicas, sino también sociales y ambientales. La interfaz es un “pasaje de confluencia” sometido al dinamismo y al cambio, que enriquece aquello que confluye en él y al mismo tiempo lo deja fluir, aunque transformado (Sagols 2006, pp. 15-16). El concepto de interfaz, originado en la física, reformulado por la cibernética y adoptado por las ciencias de la computación, remite de forma simultánea a la unión de dos facetas, ángulos o aspectos de dos sistemas físicos heterogéneos, y a la unión entre dos fases temporales distintas. El *Diccionario de la lengua española* de la RAE define la interfaz como un término derivado del inglés (de la palabra *interface*, superficie de contacto), que es aplicado en el ámbito de la informática y cuya acepción es la conexión física y funcional entre dos aparatos o sistemas aparentemente independientes, pero que pueden evolucionar conjuntamente o coevolucionar. En esta dirección, la Wikiped-

dia caracteriza una interfaz como el punto, el área, o la superficie, a lo largo de la cual dos cosas de naturaleza distinta convergen. Por extensión, se denomina interfaz a cualquier medio que permite la interconexión de dos procesos diferenciados con un único propósito común. En software, una interfaz de usuario es la parte del programa informático que permite el flujo de información entre varias aplicaciones o entre el propio programa y el usuario. Desde una perspectiva dialógica, se entiende la interfaz como una conversación entre el usuario y el sistema (o entre el usuario y el diseñador) o como el diálogo entre el organismo humano y la máquina, así como la interacción del usuario con el ordenador o la computadora.

En el campo de las ciencias de la naturaleza, la idea de interfaz también presenta rasgos interesantes e innovadores. En química, una interfaz es la superficie entre dos fases distintas en una mezcla heterogénea. En geología, una interfaz es una capa superficial o anómala que marca el punto de transición entre dos épocas o tipos geológicos. Espacialmente, la interfaz es el lugar de interacción, el espacio donde se desarrollan los intercambios. Asimismo, en el campo de las ciencias sociales, especialmente en la sociología del desarrollo y en la sociología de la tecnología, una interfaz es un punto crítico de intersección entre los mundos de vida, los campos sociales y los niveles de organización social, donde las discontinuidades sociales aparecen bajo la discrepancia en valores, intereses, conocimiento y poder, requiriendo procesos de negociación, adaptación y transformación para su resolución (Long 2001, p. 243). Está claro que desde esta perspectiva el desarrollo sostenible es una interfaz entre diversas esferas (económica, social, ecológica y política) y que dicha interfaz supone la intersección de las ciencias de la naturaleza y de las ciencias sociales y humanas en las modernas sociedades del conocimiento interdisciplinar e innovador. Desde este enfoque metodológico e integrador, el sistema Tierra es una gigantesca interfaz planetaria donde se desarrollan la biosfera y la noosfera y donde está en juego la sostenibilidad del futuro humano. La propia comunidad científica internacional que estudia estos temas se comporta como una prolongación de la noosfera en su comprensión e interacción con la biosfera. Por eso la ciencia del sistema Tierra piensa el planeta como una maquinaria de interfaces, pero ya no al viejo estilo del mecanicismo newtoniano, sino desde una visión compleja, transdisciplinar y transaccional de coevolución entre interfaces, porque ya no podemos pensar la evolución sino desde esta complejidad. Como apuntan acertadamente Jordi Bascompte y Bartolo Luque, es preciso coordinar, integrar y complementar las dos grandes visiones de la evolución que a menudo se han enfrentado de forma espuria. Por una parte, la visión de una ciencia histórica que enfatiza la contingencia, los accidentes y la irreversibilidad, y por otra, la visión de una ciencia estructuralista de redes que se basa en la comprensión de los procesos de autorganización semejantes a los otros

sistemas físicos alejados del equilibrio termodinámico (Bascompte y Luque 2012, pp. 166-169).

Pensar la vida en el Antropoceno como una interfaz de redes sociales y ecológicas en la coevolución de la biosfera y de la noosfera, buscando la convergencia y la complementariedad, será necesario para una comprensión adecuada y estructurada de nuestro mundo. En una conversación entre el neurobiólogo Jean Pierre Changeux y el filósofo Paul Ricoeur (Changeux y Ricoeur 2000, pp. 14-15), Changeux considera a las sociedades humanas como interfaces entre la fase epigenética del cerebro y la evolución biológica y genética de las especies a través de las conexiones orgánicas con el entorno físico, social y cultural. El reto para el conocimiento y la ciencia del siglo XXI es comprender adecuadamente estas interfaces en su mutualismo y antagonismo, con el fin de coadyuvar y cooperar ante los riesgos que se ciernen sobre nosotros para la supervivencia de la biodiversidad y de la diversidad humana a escala global. Avanzar en este conocimiento y superar el reduccionismo acostumbrado son dos máximas inevitables para la investigación del futuro, en el intento de generar nuevas redes sostenibles (Ayestarán 2008b). Estas dos máximas ya no son un simple deseo, sino una necesidad, porque la reciente experiencia nos ha demostrado que las crisis globales no son simples y lineales, sino complejas y sistémicas, aunque muchos gestores económicos y políticos no se hayan percatado de ello todavía. En un artículo firmado conjuntamente por científicos o expertos en esta temática, como Zalasiewicz, Williams, Steffen y el premio Nobel de Química Paul J. Crutzen (Zalasiewicz, et al. 2010, pp. 2230-2231), se afirma que ya hemos entrado en el nuevo mundo del Antropoceno, la época geológica *más breve* hasta la fecha, así como la *más política* de todas, dadas sus implicaciones. Según ellos, se trata de una época que cambiará la ciencia y la sociedad. Y razón no les falta.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a los miembros del proyecto EHU10/46 sus lecturas y sugerencias sobre las ideas aquí expresadas, así como reconocer la generosa financiación del proyecto por parte de la Universidad del País Vasco (UPV/EHU), mediante su Vicerrectorado de Investigación, dentro del cual se enmarca este trabajo.

NOTA

¹ Ignacio Ayestarán es investigador principal del proyecto EHU10/46, financiado por la Universidad del País Vasco (UPV/EHU), dentro del cual se enmarca este trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ayestarán, Ignacio (2008a), "The second Copernican revolution in the Anthropocene: an overview", *Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo* 3: 145-157.
- Ayestarán, Ignacio (2008b), "Complejidad y arquitectura de redes sostenibles entre la biosfera y la tecnosfera: de Internet a Gaia", *Ontology Studies* 8: 357-372.
- Bascompte, Jordi y Luque, Bartolo (2012), *Evolución y complejidad*. Valencia: Publicacions de la Universitat de València.
- Changeux, Jean Pierre, y Ricoeur, Paul (2000), *Ce qui nous fait penser. La nature et la règle*. París: Odile Jacob.
- Clark, William C.; Crutzen, Paul J.; y Schellnhuber, Hans Joachim (2004), "Science for global sustainability. Toward a new paradigm," in Hans Joachim Schellnhuber, Paul J. Crutzen, William C. Clark, Martin Claussen y Hermann Held (eds.), *Earth System Analysis for Sustainability: Report on the 91st Dahlem Workshop*, Cambridge, Mass., y Londres, The Massachusetts Institute of Technology Press & Dahlem University Press, pp. 1-25.
- Crutzen, Paul J. (2002), "Geology of mankind", *Nature* 415: 23.
- Le Roy, Édouard (1927), *L'Exigence idéaliste et le fait de l'évolution*. París: Boivin.
- Le Roy, Édouard (1929), *Les origines humaines et l'évolution de l'intelligence*. París: Boivin.
- Long, Norman (2001), *Development Sociology: Actor Perspectives*. Londres: Routledge.
- Lucht, Wolfgang y Pachauri, Rajendra K. (2004), "The mental component of the Earth System", in Hans Joachim Schellnhuber, Paul J. Crutzen, William C. Clark, Martin Claussen y Hermann Held (eds.), *Earth System Analysis for Sustainability: Report on the 91st Dahlem Workshop*, Cambridge, Mass., y Londres, The Massachusetts Institute of Technology Press & Dahlem University Press, pp. 341-365.
- O'Connor, Martin (2006), "The 'Four Spheres' framework for sustainability", *Ecological Complexity* 3: 285-292.
- Margulis, Lynn y Sagan, Dorion (1995), *¿Qué es la vida?* Barcelona: Tusquets.
- Maxim, Laura; Spangenberg, Joachim H.; y O'Connor, Martin (2009), "An analysis of risks for biodiversity under the DPSIR framework", *Ecological Economics* 69 (1): 12-23.
- Sagan, Dorion (1990), *Biosferas. Metamorfosis del planeta Tierra*. Madrid: Alianza.
- Sagols, Lizbeth (2006), *Interfaz bioética*. México: UNAM y Fontamara.

- Samson, Paul R. y Pitt, David (eds.) (1999), *The Biosphere and Noosphere Reader*. Londres y Nueva York: Routledge.
- Schellnhuber Hans Joachim; Crutzen, Paul J.; Clark, William C. y Hunt, Julian (2005), "Earth system analysis for sustainability", *Environment* 47 (8): 10-25.
- Schellnhuber, Hans Joachim, y Sahagian, Dork (2002), "The twenty-three GAIM questions", *Global Change Newsletter* 49: 20-21.
- Steffen Will; Grinevald, Jacques; Crutzen, Paul J.; y McNeill, John (2011), "The Anthropocene: conceptual and historical perspectives", *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 369: 842-867.
- Teilhard de Chardin, Pierre (1955), *Le phénomène humain*. París: Editions du Seuil.
- Teilhard de Chardin, Pierre (1959), *El porvenir del hombre*. Madrid: Taurus.
- Teilhard de Chardin, Pierre (1963), *El fenómeno humano*. Madrid: Taurus (trad. española de Teilhard de Chardin, 1955).
- Vernadsky, Vladimir I. (1945), "The biosphere and the noosphere", *American Scientist* 33 (1): 1-12 (trad. española en Vernadsky 1997, pp. 203-218).
- Vernadsky, Vladimir I. (1997a), *La biosfera*. Madrid: Argenteria y Visor.
- Vernadsky, Vladimir I. (1997b), "La biosfera y la noosfera", en Vladimir I. Vernadsky 1997a, pp. 203-218.
- Wikipedia (2012), "Interface", <http://es.wikipedia.org/wiki/Interface> (consultado en línea el 1 de mayo de 2012).
- Zalasiewicz, Jan; Williams, Mark; Steffen, Will; y Crutzen, Paul J. (2010), "The new world of the Anthropocene", *Environmental Science & Technology* 44 (7): 2228-2231.