

ENERGÍA Y SOSTENIBILIDAD

Luis Jair Gómez Giraldo
Profesor Titular - Universidad Nacional

"El conocimiento acerca de cómo se propagan los flujos energéticos en los ecosistemas traza los límites dentro de los cuales se sitúa, en un momento dado, el juego de las actividades económicas".
R. Passet, 1996.

El tema general del seminario que nos ha convocado a todos es el de Desarrollo sostenible, energía y paz, temática en la que se recogen tres elementos que son inseparables tanto en el contexto mundial como en el nacional; sin embargo cabe anotar que entre los tres, puestos en ese orden, el término energía, con su inequivocidad, establece un fuerte eslabón entre conceptos mucho menos inequívocos e, inclusive, con fuertes cargas ideológicas y emocionales. Esta circunstancia hace particularmente importante el tema específico que me corresponde tratar, en tanto es un núcleo duro que pretende amarrar conceptos sociales blandos.

En efecto, vamos a plantearnos la relación entre energía y sostenibilidad como punto de llegada, pero como punto de partida debe quedar claramente establecido qué se va a entender por energía y qué por sostenibilidad. En cuanto a la paz damos por supuesto que la sostenibilidad es correguisito que garantiza la existencia de un "sujeto" y un "sustrato" para la paz.

Empecemos por definir la sostenibilidad. En la presente ocasión entenderemos por sostenibilidad, en el contexto de la complejidad, a la capacidad de cualquier sistema para mantener viable su organización operativa. Como nuestro objeto específico de trabajo es la sostenibilidad ecológica en tanto haga posible la permanencia de la humanidad, se considera que la sostenibilidad, en este caso particular, hace relación a la capacidad del biosistema general para mantener viable la organización operativa que incluya al hombre. Es decir, nos interesa la ecología sólo si incluye al hombre.

Cuando se habla del biosistema hacemos referencia a una totalidad compuesta de seres vivos que, en

conjunto, - la biosfera^{*} -, e individualmente son sistemas que operan lejos del punto de equilibrio y, en consecuencia, se configuran con estructuras disipativas. Esto significa que la biosfera en general y cada organismo vivo en particular, son sistemas de trabajo que requieren un flujo continuo de energía libre para poderse mantener, es decir, operar de manera sostenible, en un estado de cuasiequilibrio, - o metaestado -, como lo designa Morin. Pero además este "sistema de trabajo", está sujeto a la segunda ley de la termodinámica, lo que implica que generan entropía, tanto energética como material. Como lo escriben Brooks y Wiley (1988): "los organismos 'obedecen' las condiciones de energía/materia de la segunda ley en forma tal que no son fundamentalmente diferentes de aquellos sistemas no-vivos similares"¹.

Se entiende entonces que el concepto de energía será el de la física, es decir, la energía como un flujo que al realizar trabajo genera entropía y, en consecuencia, se degrada, siendo indispensable disponer de una fuente que realmente el flujo continuo. Según la clásica formulación de Boltzmann de 1877

$$S = k \sum p_i \lg p_i$$

Donde:

S = entropía

k = constante de Boltzmann

p_i = es la probabilidad del sistema de alcanzar i complejiones posibles al mismo, en cualquier tiempo.

^{*} Biosfera en este caso, es la denominación para el conjunto de seres vivos existentes, como tradicionalmente la entiende la ecología, y no como el proceso de transformación materia inerte - materia viva, según lo entiende V. I. Vernadsky.

En el equilibrio, el sistema está homogéneamente distribuido entre todas las complejiones posibles, así que todas las p_i son iguales, y $S = S_{max} = \log \Omega$ donde Ω es el número de complejiones. Boltzmann mismo utilizó el término "probabilidad" en lugar de "distribución de frecuencia", como originalmente se consideró, para la ocurrencia de varias complejiones.

En este caso si el equilibrio es el atractor universal (atractor de punto fijo) de todos los sistemas, tal como lo postuló la termodinámica clásica, el equilibrio es el estado "más probable" para el sistema. En igual sentido cualquier estado lejos del equilibrio tiene que ser, en algún sentido, menos probable que aquel esperado de equilibrio.

La validez de esta termodinámica clásica parte de un desarrollo que adoptó la idealización de que los "sistemas" son conjuntos "cerrados", es decir, tienen una cantidad fija de partículas (materia) y pueden o no intercambiar energía con el entorno. Si el sistema no intercambia ni materia, ni energía con el medio se denomina "aislado".

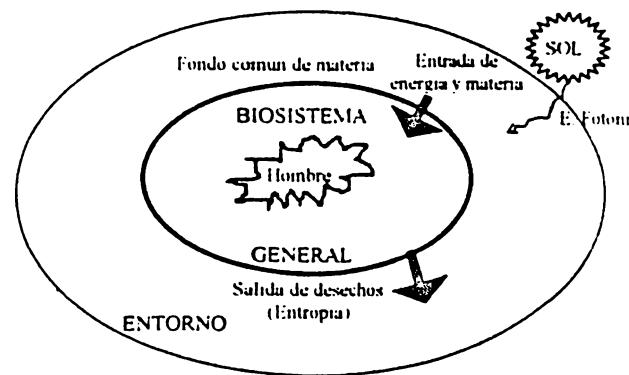
Entendemos sin embargo, que tanto el biosistema, como el organismo vivo individual, no pueden llegar al estado de equilibrio como lo entiende la termodinámica clásica, ya que ese estado es su muerte; sino que son sistemas que operan lejos del punto de equilibrio, es decir, es un estado termodinámico de no equilibrio, pero además, siguiendo a Prigogine² los "sistemas vivos" tienen dos caracteres importantes: "estos presentan un orden arquitectónico (estructuras macromoleculares) y un orden funcional (metabolismo) enormemente sofisticados"³. Estos dos ordenes se pueden hacer reconocibles a partir de algunos caracteres comunes relevantes propios de los sistemas vivos, como los que el mismo Prigogine⁴ nos describe:

1. "Incluso en las células más sencillas, la actividad normal del metabolismo implica varios miles de reacciones químicas acopladas. De ello se deduce la imperiosa necesidad de que todos estos procesos respondan a una coordinación. Los mecanismos de coordinación constituyen un orden funcional extremadamente sofisticado.
2. "Además, prosigue Prigogine, las reacciones metabólicas requieren catalizadores específicos, las enzimas, que son macromoléculas con una

organización espacial muy compleja. Por lo tanto, el organismo tiene que sintetizar estas sustancias, estas estructuras". De ahí que sean sistemas autopoéticos, autoorganizados y autorreferenciados.

Como la dinámica interna de la célula tanto en el orden arquitectónico como en el funcional, sigue las leyes de la termodinámica, hay generación de entropía que de no contrarrestarse conduciría necesariamente a la desaparición de la organización operativa de los organismos vivos en particular, y por consecuencia del biosistema en general.

Para contrarrestar el efecto demoledor de la entropía, estos sistemas son abiertos, lo que significa que intercambian materia y energía con el entorno, lo que precisamente les permite ser autopoéticos y auto-organizados. De esta manera el desorden entrópico que necesariamente ha debido producirse dentro del biosistema o el organismo vivo particular, puede ser contrarrestado incorporando energía y materia del ambiente con baja entropía, y disipando, al mismo ambiente, los desechos energéticos y materiales con alta entropía. Para lograr este efecto surgen las llamadas estructuras disipativas que permiten articular un sistema que está fuera del equilibrio termodinámico, con otro sistema externo, el ambiente, también fuera del equilibrio. "En tal caso, - escribe Prigogine -, y siempre que las reservas externas de energía y materia sean suficientemente grandes para que el estado sea permanente, el sistema puede tender hacia un régimen constante distinto al del equilibrio"⁵.



En términos estrictamente termodinámicos, la entropía generada dentro de los sistemas vivos, es expulsada al exterior y se aumenta necesariamente la entropía del ambiente. La notación utilizada por Prigogine⁶ es la siguiente:

$$dS = d_e S + d_i S$$

Donde:

dS : es el cambio total en entropía, tanto en el sistema como en sus alrededores;

$d_e S$: es el cambio de entropía debido a los intercambios entre el ambiente y el sistema; y

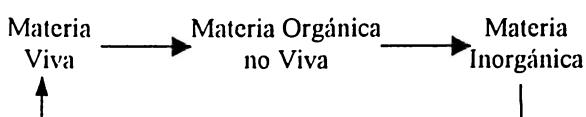
$d_i S$: es el cambio en entropía producido por los procesos irreversibles dentro del sistema.

De esta manera, señalan Brooks y Wiley (1988) “en tanto los sistemas vivos incorporan material de baja entropía y retornan productos de desecho de alta entropía al ambiente, los sistemas biológicos no violan la segunda ley”⁷

Es en este punto donde cabe establecer la relación entre energía y sostenibilidad.

Se pueden reconocer tres condiciones obvias para que el biosistema general, que incluye al hombre, sea sostenible en el largo plazo, más allá de la dinámica evolutiva consustancial a todo proceso irreversible:

1. Como la energía que alimenta todo proceso termodinámico necesariamente se degrada hasta estados de “no disponibilidad” para el mismo proceso, ha de existir una fuente “inagotable” de energía de baja entropía que evite que el proceso se agote.
2. Como la materia que compone arquitectónicamente los organismos vivos es limitada, debe existir un reciclaje permanente entre:



3. La segunda condición está inextricablemente unida a la primera y esta relación sólo es posible dentro de unas condiciones de compatibilidad entre los seres vivos y su entorno.

Respecto a la primera condición hay que decir que los seres vivos sólo utilizan energía de enlaces químicos, de moléculas orgánicas, fundamentalmente carbohidratos, es decir, energía contenida en compuestos químicos hechos por procesos biológicos. Se explica así por qué los seres vivos están organizados en una tupida red de dependencias, en correspondencia con lo que Levins⁸ ha llamado un “sistema complejo de desarrollo”, en el cual los últimos en surgir en el proceso evolutivo, dependen de los anteriores para su suministro de energía y materia.

No debe ésto sin embargo, conducir a la idea de que el proceso evolutivo es lineal, según se representa tan equivocadamente, con la expresión, ya muy generalizada, de cadena alimenticia. De lo que se trata en realidad es de una red trófica como resultado de lo que Margalef⁹, tan acertadamente denomina las “estrategias de la vida”. Esto permite replantear dos de las ecuaciones clásicas de la termodinámica, en consideración de cambios en presión (P), volumen (V) y temperatura (T), que determinan el nivel de entropía S, bajo el supuesto de sistemas físicos cerrados, aislados o no:

$$\begin{aligned} \Delta PV/T &\propto S \\ \Delta G &= \Delta U + P\Delta V - T\Delta S \\ &= \Delta H - T\Delta S \end{aligned}$$

pero resulta que tanto los seres vivos individualmente como el biosistema general operan bajos condiciones de temperatura y presión constantes, o por lo menos con márgenes de variabilidad muy estrechos. En cambio el volumen en el ser vivo individual se expresa como “crecimiento”, y en el biosistema como aumento de niveles jerárquicos, es decir, como evolución o biodiversidad.

Esto significa que los seres vivos son sistemas termodinámicamente diferentes a los sistemas físicos inertes, en tanto operan en condiciones de temperatura y presión constantes sin ser aislados.

En esa perspectiva la emergencia, muy reciente, del hombre dentro del proceso bioevolutivo, supone que existía ya toda una organización operativa del biosistema que hizo posible la disponibilidad de energía suficiente para su establecimiento como un nuevo nodo en la red. A pesar de ser un ser vivo tan recientemente incrustado en la red, no ostenta un nivel de especialización tan marcado como otras especies

previas, y puede, en consecuencia, tomar la energía y materia para su autopoiesis de un variado número de especies, lo que explica que pueda tomar cereales tanto directamente como a través de los animales fitófagos, lo que supone que a medida que la energía pasa de un nodo a otro va disminuyendo en su disponibilidad, lo que obligaría a transformar la clásica ecuación de la energía libre, ($\Delta F = E - T\Delta S$), por una que incluya el número de nodos (N_o) en sustitución de T , en tanto la F depende del número de nodos recorridos desde los autotrofos hasta el hombre, es decir, del número de transformaciones sufridas dentro de la red trófica.

En este sentido la expansión de cualquier especie, - comunidad con metabolismo (alimento) similar -, depende íntegramente de la energía disponible, la que a su turno, está atada a la ubicación que ella logre dentro de la red; esto es, de la cantidad de nodos previos que debe atravesar la energía disponible en enlaces químicos de compuestos orgánicos antes de llegar a la especie en cuestión, y, además del nivel de especialización alimenticia de la especie. Para el caso concreto del humano, un recién llegado a la biosfera, se encuentra un elemento adicional con consecuencias termodinámicas, se trata, de una nueva manifestación emergente del proceso creciente de cefalización, hablamos de la Noosfera, que introduce el componente exosomático, - las herramientas como expresión de la tecnología -, como construcción típica de la Noosfera.

El punto es particularmente conflictivo a dos niveles:

Primero: El desarrollo cerebral y la posición erecta le dieron ventajas importantes al *Homo sapiens*, para hacer modificaciones en el ambiente que le permitieran desplegarse como biomasa, en casi todos los nichos existentes sobre el planeta. Esto ha provocado un desplazamiento muy notable de la biomasa total hacia el *Homo sapiens*, lo que necesariamente implica restricciones de volumen, mejor regresiones de volumen en biomasa de otras especies; esto es, el hombre aumenta en términos de biomasa, a costa de otras biomassas, por limitación del volumen total de masa. Esto significa que cualquier modificación proporcional a su favor va acompañada de una pérdida complementaria en volumen de biomasa en otras especies. Además el *Homo sapiens* para poder mantener su nivel de expansión tiene que asegurar sus fuentes energéticas, lo que exige un proceso selectivo

de las especies, es decir, una nueva jerarquización, en este caso artificial, con el objetivo de garantizar los suministros suficientes de masa/energía, que hagan viable su expansión. Es este el papel y fundamento de la agricultura, cuyo efecto ecológico inmediato es la disminución creciente, paralela y complementaria al aumento de la biomasa humana, de la biodiversidad. Pero este aumento de la biomasa humana con detrimento de otras, no es neutral, puesto que significa una disminución de la complejidad biosistémica y, en consecuencia, una mayor vulnerabilidad.

Se abre acá uno de los aspectos negativos más importantes de esta discusión. Si ordenamos la biomasa de especies con respecto a la biomasa humana (B_h), se tienen biomassas de primer orden (B_1), aquellas que son el aporte directo de masa/energía para el humano; de segundo orden (B_2), aquellas que son arrastradas por las de primer orden, en tanto ordenamiento jerárquico, y de tercer orden (B_3), cuando no tienen dependencias directas con las anteriores. La notación podría ser:

$$B_t = B_h + B_1 + B_2 + B_3$$

donde las B_1 , B_2 y B_3 son complementarias de la B_h , dado un volumen cuasiestable de ésta. Es ésta la razón de la disminución de la complejidad biosistémica; lo que va en contra de la sostenibilidad del biosistema, puesto que es mediante el "incremento de complejidad organizacional", como Morin¹⁰ lo describe, que los procesos de autoorganización logran aumentar la capacidad de disipación de gradientes que los llevaría, sino se disipan, al equilibrio termodinámico de punto fijo, o extinción.

En términos de sostenibilidad se trata de una disminución de "la urdimbre" que establece las dimensiones y soporta el conjunto, para valernos de la cita que Schneider y Kay (1999)¹¹, hacen de Blum (1968). Se produce así, con la disminución de la urdimbre, un debilitamiento de su resistencia, es decir, se altera negativamente el proceso termodinámico en el biosistema al actuar sobre la biodiversidad, entendida tanto en el sentido de Schneider y Kay¹², esto es, como aumento de la sofisticación de los mecanismos, - biodiversidad -, para resistir un desplazamiento ulterior del equilibrio, y conservar así su cuasiequilibrio (principio de Le Chatelier); como en el de Rio92, que entiende la biodiversidad como "la variabilidad de los organismos vivos de cualquier

origen"; vale decir, la disminución de especies, disminuye la tasa de transferencia de calor y materia y de destrucción de gradientes correspondientes de temperatura y descomplejificación de materia orgánica, y lo hace más vulnerable a la presión por llegar al equilibrio termodinámico, en tanto disminuye la complejidad necesaria para disipar la entropía de energía/materia, generada.

Segundo: Aparece acá el otro elemento importante: la humanidad necesita aumentar la energía/materia orgánica disponible para garantizar su autopoiesis y para el efecto dispone de dos estrategias:

1. Aumentando la captación de energía radiante del sol mediante el incremento del tamaño de los nodos próximos al hombre, lo que se consigue a través de privilegiar los fotosintetizadores que sirven de alimento directo para la humanidad; pero dada una superficie fija con posible uso agrícola sobre el planeta, esto significa que el aumento del tamaño de unos nodos, se consigue sólo a costa de la desaparición o empequeñecimiento de otros, es decir, hay una peligrosa pérdida de densidad de la urdimbre (se rala la urdimbre), lo que supone riesgos en la sostenibilidad del biosistema.
2. Incrementando la productividad de masa/energía alimentaria para la humanidad por unidad de ser vivo y de tiempo, mediante el expediente de la técnica del "mejoramiento" genético. Esta técnica implica una disminución de la heterocigocidad y, por consecuencia, una disminución de la capacidad de respuesta exitosa a las aleatoriedades del ambiente. De ahí que la homocigocización de una población de seres vivos, por aplicación de la técnica del mejoramiento genético, exige una homogeneización del entorno, de la construcción de un microambiente; con lo cual se quiere obtener una "adecuación perfecta de una especie a un medio determinado", lo cual, ya lo ha dicho Morin¹³, "resulta inadaptada y fatal desde el momento en que sobreviene una modificación en las condiciones de adaptación Así, demasiada adaptación daña la vida", concluye el autor galo.

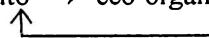
Se da en este caso una especie de deriva genética artificial, es decir, sin el proceso de coevolución natural ser vivo - medioambiente, según lo

describen Maturana y Varela¹⁴, con la consiguiente pérdida de genes individuales y genomas enteros, con lo cual, se pone en grave riesgo la heterocigocidad, fuente central de capacidad de la adaptación, ya que se disminuye la urdimbre del "tapiz genético" del biosistema.

3. Pero además esta homogeneización del genoma poblacional va seguido, según las reglas en que se desenvuelve la revolución verde, de un aumento importante de la productividad por unidad de superficie, mediante el expediente del monocultivo a gran escala, lo que trae como consecuencia en primer lugar, el aumento en número de individuos de las poblaciones de seres vivos que constituyen la biomasa de 2º orden, - plagas se dice -, y en segundo lugar, un peligroso desajuste de productores/descomponedores, que provoca un desequilibrio en el reciclaje de materia que se manifiesta en el aumento de la desertización del planeta.

Hasta acá se ha hecho un análisis de la energía endobiosistémica, y aun endosomática; pero la teoría general de sistemas ha establecido (Morin, Maturana, Luhmann) que el sistema se hace identificable y distinguible como tal, sólo en el momento en que se diferencia del entorno, es decir, se reconoce que todo sistema necesita un entorno. Luhmann¹⁵ lo señala con extraordinaria claridad: "el entorno aparece, según la estructura del tiempo del sistema, dividido en abastecimiento y recepción", expresión que es particularmente cierta en el caso del biosistema en tanto abastece de materia inespecífica y energía al biosistema y recibe de éste materia y energía degradada.

Es sobre este punto donde Prigogine ha construido su teoría de la Termodinámica generalizada, con sus estructuras disipativas; pero además, donde Maturana planteó el concepto de "llevar el mundo a la mano", y Morin el bucle recursivo auto → eco-organización.



De esta manera se entiende que hay un proceso permanente de coevolución del entorno, el biosistema en general y las especies en particular. En efecto, cada uno de los subsistemas (variables de estado, nodos o especies) necesita de condiciones especiales dentro del sistema, - las estructuras -, que le permitan realizar su metabolismo, para que a su turno el biosistema opere

como tal; pero a su turno, el proceso de autopoiesis con base en la autorreferencia característico del ser vivo, requiere del suministro adecuado y oportuno de materia y energía apropiadas en el medio.

Se le debe fundamentalmente a Lovelock y Margulis el haber iniciado el estudio a fondo de ese proceso coevolutivo biosistema - entorno, hasta reconocer cómo este último, en su estado actual, es explicable sólo por la existencia de la vida: pH, temperatura, presión atmosférica, niveles de O y N moleculares, etc., y en consecuencia con ello, cómo la vida actual sólo es posible en condiciones de temperatura, presión atmosférica, pH y composición de la atmósfera dentro de márgenes muy estrechos.

Es ahí donde la energía exobiosistémica y exosomática juega un papel crítico en la sostenibilidad ecológica. Algunas pocas referencias pueden ilustrar suficientemente este aspecto:

1. En 1970, Hollis Dole secretario asistente del interior en el gobierno de Estados Unidos, según lo refiere McGauhey¹⁶ en la Encyclopedie Britannica (Science and Future, 1972), fue llamado a declarar ante el parlamento, en un debate que se llevó a cabo a raíz de la intensa agitación popular que entre 1968 y 1971 vivió ese país*. Su declaración no puede ser más reveladora: "en los 40 años anteriores (1930 - 1970), Estados Unidos consumió más minerales, productos minerales y combustibles fósiles que toda la humanidad en su historia anterior".
2. Bermejo¹⁷ lo cuantifica de otra manera: "La producción industrial ha crecido 50 veces en los últimos 100 años, y las cuatro quintas partes de este crecimiento se ha producido a partir de 1950".
3. En 1960 el consumo mundial de energía exosomática se calculaba en 2930 millones de toneladas de petróleo equivalente, de los cuales el 74% era de origen fósil (carbón, petróleo y gas); y era inexistente la energía nuclear a nivel público; para 1998, el consumo total fue de 8477

millones de toneladas es decir, un 289% de incremento, de las cuales la energía de origen fósil constituyó el 90% y la nuclear el 7,4%.

4. R. Passet¹⁸ calcula que entre 1875 y 1970 se pasa de un consumo diario de energía por persona de 77.000 calorías a 230.000, distribuidas en alimentación, usos domésticos y comercio, agricultura e industria, y transporte. Es decir, en 95 años se aumentó en 199% el consumo energético por persona, por día.

Estas referencias entre muchas más, nos muestra que la tecnología de la producción industrial a gran escala, es un fenómeno reciente y que ha crecido en forma exponencial desde la revolución industrial del siglo XVIII. Este fenómeno íntimamente relacionado con el sistema económico, - crecimiento y acumulación -, y con el aumento demográfico, tiene como característica central en nuestra perspectiva de análisis, la de ser energético-dependiente, lo que supone que la energía de la fotosíntesis corriente, sea insuficiente y haya que echar mano de la energía de biomasa fósil y de la nuclear en gran proporción. Como los niveles en el uso de estas fuentes energéticas ha crecido a ritmos tan dramáticos, la organización operativa del biosistema actual ha comenzado a mostrar dificultades crecientes para reciclar las cantidades tan altas de CO₂, es decir, el ciclo fundamental:



recibe una cantidad de CO₂ adicional a la generada en el proceso de respiración, la cual entonces se desplaza a la troposfera y se transforma en gas invernadero y fuente de lluvia ácida, alterando peligrosamente el entorno físico-químico en sus constantes de temperatura, humedad y pH. Los cambios en estas constantes se dan en un tiempo histórico, es decir, tiempo de vida humana, muy rápido en comparación con el tiempo biológico; lo que significa que los ajustes estructurales en muchos organismos vivos, se desfasan de los límites sistémicos de su organización operativa, lo que a su turno influye en la totalidad del biosistema. Así, hacia 1750 el aire tenía una concentración de CO₂ de 270 partes por millón (p.p.m.), hacia 1958 había alcanzado 314 p.p.m., y, dos décadas después (1978) había llegado hasta 334 p.p.m.¹⁹. Actualmente, según el observatorio de Mauna Loa (Hawai) los niveles superan las 360

* De acuerdo con los organizadores, 1500 colegios y 10.000 escuelas tomaron parte en el movimiento del 22 de Abril de 1968. Hubo manifestaciones callejeras y grandes marchas en New York, San Francisco y Washington. Time estimó en 20 millones de personas los que tomaron parte en ese movimiento.

p.p.m.²⁰. Este ritmo es claramente explicable si se recuerda que cada tonelada de carbón produce tres toneladas de CO₂ (Tiezzi, 1990), y actualmente se consumen unos 6000 millones de toneladas.

Además del CO₂, la combustión de fuentes fósiles de energía emiten a la atmósfera, los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los de azufre (SO_x), responsables de la lluvia ácida. Tiezzi²¹ anota que en 1980 los Estados Unidos introdujeron a la atmósfera 26 millones de toneladas de SO₂ y 22 millones de toneladas de óxidos de nitrógeno. El efecto de estos óxidos al acidificar la lluvia es bastante dañino en casi todos los seres vivos, así los peces en agua con pH entre 5 y 4,5 no pueden vivir; los moluscos mueren a pH menores de 6. El mismo Tiezzi²² informa que en 1979 la nieve que caía sobre Montana tenía un pH de 2,6; en Escocia se respira niebla de pH = 2,5; y en Milán en enero de 1983, cayó lluvia con un pH de 3,6. Uno de los casos más dramáticos es el reportado por Tudge²³ de una lluvia ácida en Londres en 1952 con un pH estimado de 1,6. Son también conocidos los efectos devastadores de esta lluvia ácida sobre miles de ríos y algunos lagos escandinavos donde desaparecieron el salmón y el arco iris. (Tudge).

Otro caso, para mencionar uno más de los efectos indeseables del uso de la energía exosomática, en este caso la nuclear, es la producción de plutonio en las centrales termonucleares comerciales del tipo PWR (Pressure water reactor). Así; en una planta de 1000 MW de potencia eléctrica, que anualmente produce entre 5 y 6 mil millones de kwh, se necesitan unas 170 toneladas de U₃O₈ (torta amarilla) cada año y se arrojan, como desechos anuales, 31,8 toneladas de uranio, 300 kilogramos de plutonio y unos 900 kilogramos de productos de fisión y actínidos²⁴. Estos residuos, dicen los autores, deben mantenerse aislados de la biosfera por más de 10.000 años, cifra ésta muy grave en si misma, aunque bastante conservadora si se tiene en cuenta que según Tiezzi²⁵ la radioactividad del plutonio es de unos 24 mil años, lo que naturalmente implica, por sus letales efectos, una hipoteca sobre la biosfera, con un plazo que supera en su duración, a todo el período de vida del hombre sobre la tierra desde el paso del paleolítico al neolítico.

Hay que decir entonces que en un trato mefistofélico, comprometimos nuestro futuro por un engañoso presente en brazos de una tecnología incapaz de

franquear la sólida barrera de la segunda ley de la termodinámica. La implicación es evidente, estamos poniendo en grave riesgo la sostenibilidad ecológica del biosistema y en consecuencia la permanencia de la humanidad sobre el planeta.

BIBLIOGRAFÍA

- ¹ D. R. Brooks and E. O. Wiley. *Evolution as entropy. (Toward a unified theory of biology)*. 2nd edition. The university Chicago press. 1988. P. 33.
- ² I. Prigogine. La termodinámica de la vida. En “¿Tan sólo una ilusión?”. Trad. por F. Martín. Tusquets editores. Barcelona. 1993. P. 305.
- ³ Idem, p. 312.
- ⁴ Idem, p. 311.
- ⁵ Idem, p. 316.
- ⁶ Idem, p. 307.
- ⁷ Opus cit., p. 9.
- ⁸ R. Levins. Sistemas complejos. En “Hacia una biología teórica”. Editado por C. H. Waddington y otros. Trad. por M. Franco. Alianza editorial. Madrid. 1976. P. 484.
- ⁹ R. Margalef. *Ecología*. 5a. ed. Editorial Planeta. Barcelona. 1992. P. 111.
- ¹⁰ E. Morin. *El Método. 1. La naturaleza de la naturaleza*. Trad. por A. Sánchez. 2a. ed. Ediciones Cátedra. Madrid. 1986. P. 349.
- ¹¹ E. D. Schneider y J. Kay. Orden a partir del desorden: la termodinámica de la complejidad en biología. En “La biología del futuro”. Trad. por A. García. Tusquets editores. Barcelona. 1999. P. 236.
- ¹² Idem, p. 226 - 227.
- ¹³ E. Morin. *El método. 2. La vida de la vida*. Trad. por A. Sánchez. 2a. ed. Ediciones Cátedra. Madrid. 1993. P. 67.
- ¹⁴ H. Maturana y F. Varela. *El árbol del conocimiento*. Editorial Debate. Madrid. 1990. P. 99.

¹⁵ N. Luhmann. Sistemas sociales (Lineamientos para una teoría general). Trad. por S. Pappe y B. Erker. Anthropos editorial. Barcelona. 1998. P. 194.

¹⁶ P. H. McGauhey. Buried in affluence. Britannica Yearbook of Science and future. 1972. Encyclopædia Britannica. William Benton, Publ. Chicago. 1971. P. 356.

¹⁷ R. Bermejo. Ecología *versus* mercado capitalista. En “De la economía a la ecología”. Editorial Trotta. Madrid. 1995. P. 49.

¹⁸ R. Passet. L'Économique et Le vivant. 2e. ed. Economica. Paris. 1996. P. 137.

¹⁹ E. Tiezzi. Tiempos históricos, tiempos biológicos. Trad. por I. Rosas. Fondo de cultura económica. México. 1990. P. 183.

²⁰ P. Dayal. Carbon trading and sequestration projects offer global warming solutions. EM feature. March 2000. P.p. 15 - 24.

²¹ Opus cit., p. 196.

²² Idem, p. 198.

²³ C. Tudge. Global Ecology. Natural history museum publications. London. 1991. P. 92.

²⁴ J. Puig y J. Corominas. La ruta de la energía. Edit. Anthropos. Barcelona. 1990. P. 354.

²⁵ Opus cit., p. 125.