

TERMODINAMICA DE ECOSISTEMAS : UNA APROXIMACION

Germán Raúl Gómez Palacio¹

RESUMEN

La ecología actual no es ya una ciencia puramente descriptiva y autosuficiente. Dada la naturaleza compleja de los ecosistemas, ha sido necesario recurrir a disciplinas como la física, la química, y a herramientas matemáticas como la teoría de catástrofes, la teoría de fractales, la cibernética y la teoría de redes, para el estudio y predicción de su comportamiento. La termodinámica -en sus distintos estadios - también aporta a esa visión pluralista, tal vez la única aproximada al comportamiento real de un ecosistema.

Se presentan algunas ideas sobre la importancia que pueden tener conceptos como la energía, la entropía, la exergía, la información, el no equilibrio en el análisis de los procesos que tienen lugar en ecosistemas.

Palabras clave: ecología, termodinámica, ecosistema, exergía, información.

ABSTRACT

ECOSYSTEM THERMODYNAMICS

Ecology is no more a descriptive and self - sufficient science. Many view points are needed simultaneously to give a full coverage of such complex systems: ecosystems. These viewpoints come from physics, chemistry, nuclear physics... Without a new far from equilibrium thermodynamics and without new mathematical tools such as catastrophe theory, fractal theory, cybernetics and network theory, the development of ecosystem science would never have reached the point of today. Some ideas are presented about the importance that concepts such as energy, entropy, exergy,

¹ Profesor Asociado. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Apartado 1027.

information and none equilibrium have in the analysis of processes taking place in ecosystems.

Key words: ecology, thermodynamics, ecosystem, exergy, information.

INTRODUCCION

En la ciencia moderna se asiste al derrumbamiento de las fronteras entre las distintas áreas del conocimiento; sucede, y con frecuencia, que áreas pensadas como completamente distintas repentinamente se ve que están relacionadas. Tal es el caso de la biología, y específicamente de la ecología: hoy es insostenible el punto de vista según el cual la materia viviente contiene una fuerza componente extra que está por fuera del ámbito de las ciencias físicas y químicas. También es interesante notar como nuestras percepciones del mundo han cambiado de ópticas esencialmente estáticas a dinámicas y, en época muy reciente, de una preocupación en sistemas aislados a un interés en aumento en sistemas interactuantes. La ecología vuelve a servir de ilustración en este punto. Así se habla ya de ecosistemas, en el ámbito de los sistemas físicos, para designar el nivel de organización en el que interactúan individuos de diversas especies dentro de una matriz física común (Margalef, 1992). El sentimiento ahora es que

un sistema dinámico (con sus posibilidades para corregir perturbaciones) es realmente un objeto más saludable (más estable) que uno estático. Algo similar se piensa de los sistemas que generan configuraciones (y las mantienen) con interacción (por ejemplo, en la forma de entrada de energía) versus los sistemas aislados (condenados a una muerte térmica) (Feistel y Ebeling, 1989). Expresado en otros términos, la ciencia de las últimas décadas encara nuevos retos (Jørgensen, 1992): ¿Qué hacer con sistemas complejos? ¿Qué propiedades tienen? ¿Podemos de alguna manera describirlas cuantitativamente? ¿Debería aprenderse de las ciencias más exactas tales como la física, la física nuclear, la astronomía o la química? No hay que olvidar que estas ciencias han evolucionado hacia la solución de problemas aún más complejos, a lo que han contribuido, sin duda, los desarrollos en la ciencia de la computación; la termodinámica de sistemas lejos del equilibrio; la aparición de nuevas herramientas matemáticas: teoría de catástrofes, teoría de fractales, cibernética y

teoría de redes.

Aunque en ecología los resultados de la aplicación de los nuevos conceptos e instrumentos no son todavía contundentes, en lo concerniente al poder predictivo del comportamiento de ecosistemas, dada la incertidumbre ocasionada por el alto grado de complicación que muestran las configuraciones alcanzadas, sí se ha logrado abandonar el carácter puramente descriptivo de esta ciencia en el pasado. Los métodos y conceptos se han enriquecido con los provenientes de otras disciplinas. Una prueba de ello es la definición que Ramón Margalef, un eminente ecólogo español, da de la ecología, al considerarla como la biofísica de los ecosistemas (Margalef, 1992). En esta perspectiva, puede pensarse que de las secciones modernas básicas de la biofísica teórica de sistemas complejos, dos de ellas pueden encontrar aplicación en el desarrollo teórico de la ecología (Volkenstein, 1988):

1. la teoría general de los sistemas dinámicos disipativos, no lineales - la termodinámica de procesos irreversibles y el modelado cinético,
2. La teoría general y el modelado de los procesos de desarrollo

biológico, incluyendo varias aproximaciones a estos fenómenos basadas en la teoría de la información.

Esta irrupción de otras disciplinas ha ocasionado el surgimiento de diversas teorías de ecosistemas en los últimos veinte años. Lo único cierto es que ninguna de ellas, por sí sola, podrá ser comprensiva del comportamiento complejo propio de estos sistemas; pero lo que tampoco se puede desconocer es el aporte de cada una de ellas, con conceptos, sugerencias, para configurar así una visión pluralista, tal vez la única aproximada al comportamiento real de un ecosistema. Se trata, ni más ni menos, de tomar partido por un enfoque holista, caracterizado por la síntesis, sin descalificar y requiriendo, por el contrario, de las tareas que corresponden a las nuevas observaciones y análisis, que con mayor o menor propiedad se califican de reduccionistas. El bosque puede seguirse mirando con distintos ojos: los que se quedan en el árbol y, si se puede, en la explicación de cada fase de sus procesos; y los que sólo ven el bosque. Ambas miradas son complementarias y necesarias.

Muchos de los enfoques nuevos y sintetizadores en ecología, que han hecho de ella una ciencia holista,

están basados en la termodinámica clásica y su extensión moderna la termodinámica de sistemas fuera de equilibrio. Es la termodinámica una disciplina científica orientada holísticamente en química y física. Un ejemplo sencillo puede ilustrar el pensamiento integral que subyace en la termodinámica: una descripción reduccionista de las moléculas de un gas en un recipiente requerirá conocer la velocidad y la dirección del movimiento de cada molécula. El enfoque termodinámico emplea únicamente variables macroscópicas, como la temperatura, la presión, en tal descripción, toda vez que la energía cinética de una molécula es proporcional a la temperatura absoluta. Pero de nuevo, pensar en lo excluyente de ambos enfoques es inútil, dada la complementariedad existente entre ellos.

La atención se centra ahora en la presentación de algunas ideas sobre las posibilidades de la aplicación de la termodinámica -en sus distintos estadios- al estudio de los procesos que tienen lugar en ecosistemas.

TERMODINAMICA Y ECOLOGIA

La termodinámica tuvo su origen en el estudio del calor; pero, con la introducción de la energía como concepto unificador, pasó a ser la ciencia de las transformaciones de la

energía en todas sus formas. Se basa en algunos principios, muy pocos, llamados leyes de la termodinámica, que vienen a ser sucintos compendios de la experiencia cotidiana en lo relativo al comportamiento de la energía en el curso de sus transformaciones (Atkins, 1992).

El enunciado común de la Primera Ley establece: "La energía se conserva". (Hoy es más acertado escribir "La energía y la materia se conservan", si se tiene en cuenta la interconvertibilidad de ellas). La energía se constituyó en un hito de la ciencia del siglo XIX; era un concepto genuinamente abstracto, que desplazó a la fuerza como idea unificadora. Aunque el uso común ha traído como consecuencia una noción de energía intuitivamente obvia y una definición, por lo menos inexacta, de la misma -aquella conocida "capacidad para realizar trabajo" la verdad es que se trata de un concepto que encierra gran riqueza intelectual.

La Segunda Ley admite que existe una disimetría fundamental en la naturaleza. Cuanto hay a nuestro alrededor nos habla de disimetría: los cuerpos calientes se enfrían, mientras que ningún cuerpo frío se calienta espontáneamente; el agua desciende a lo largo de una

montaña, no lo hace en sentido inverso, a menos que se haga uso de una bomba. Tal es el rostro de la naturaleza, cuya independencia de la ley de conservación de la energía pusieron de manifiesto Kelvin y Clausius: aunque la cantidad total de energía debe conservarse en cualquier proceso, la distribución o calidad de esta energía cambia de una forma irreversible (Atkins, 1992). La energía no puede utilizarse dos veces seguidas de la misma manera; en otros términos, se degrada. Esta degradación se asocia con el aumento del valor de una función calculada, derivada de la segunda ley, que se llama la entropía. Es la segunda ley la que le confiere al tiempo un papel principal, algo que reviste particular importancia en los seres vivos.

Las otras dos leyes la tercera ley, que se ocupa de las propiedades de la materia a muy bajas temperaturas, y la ley cero, que describe la posibilidad de definir la temperatura de los objetos tienen importancia menor en el contexto de la biología y la ecología.

El interrogante que surge es: ¿Cuántas de las propiedades de los ecosistemas pueden derivarse de la aplicación progresiva de los dos primeros principios y las consecuencias de éstos? Es bien

reconocido que todos los organismos vivos y sus conjuntos dependen para su sostenimiento, crecimiento y desarrollo de la provisión de materiales y energía suministrados por su ambiente; los ecosistemas, por ejemplo, requieren una entrada de nutrientes y energía solar para mantenerse y desarrollarse. Distintos procesos degradan energía para transformar materiales, a partir de sus estados originales, en estados que son más útiles en el sostenimiento de la estructura y función de dichos sistemas. En el curso de estos procesos, algunos materiales terminan como productos de desecho y la energía se disipa al ambiente en la forma de calor. Mientras se producen esos cambios, la energía ha interactuado con la materia, de suerte que lo que se ha llamado degradación de la energía aparece reflejado en otro lado, seguramente contabilizable también, a través de la adquisición de complejidad por parte de los sistemas materiales en los que dichos cambios de energía se suceden. Dicha complejidad se manifiesta en el surgimiento de mecanismos autocatalíticos, autoorganizativos, autorreguladores, autodeterminantes y autoevolucionarios, características fundamentales de las unidades que la ciencia llama ecosistemas. Es de notar que estos procesos en ningún momento representan una violación

de la segunda ley como se pensaba en épocas pasadas pues si bien es cierto que los ecosistemas pueden crear y mantener organización y orden, características de sistemas con baja entropía, ello se logra a expensas de mayor desorden y aleatoriedad (entropía) en los alrededores.

Varios han sido los intentos para establecer las relaciones entre la transformación de materiales y el uso de la energía en sistemas ecológicos, con la consiguiente aparición de nuevas estructuras y de nuevas propiedades. Desde 1944, cuando Schrödinger en su original libro *¿Qué es la Vida?* (Schrödinger, 1988) plantea las premisas "orden a partir del orden" y "orden a partir del desorden" siendo, sobre todo la última, un esfuerzo por enlazar la biología con los principios fundamentales de la termodinámica, se han sucedido propuestas encaminadas a contabilizar la complejidad resultante. A algunas de ellas se hará una breve referencia más adelante, poniendo de presente antes que la riqueza de métodos y conceptos desarrollados por la termodinámica tropieza con varios escollos a la hora de aplicarlos a los sistemas vivientes complejos. Existen problemas al menos en los siguientes tres niveles de

comprensión (Ruth, 1995): primero, los análisis termodinámicos exigen una definición cuidadosa de los límites del sistema en el espacio y el tiempo y el conocimiento de la naturaleza de los procesos en un sistema. Conceptualmente no son problemas; sin embargo, con frecuencia no se dispone de los datos que coincidan con las definiciones apropiadas sistema límites requeridas por los análisis termodinámicos. A esto se añade que frecuentemente hay que hacer suposiciones simplificadoras acerca de la naturaleza de los procesos respectivos. Por ejemplo, es común asumir equilibrio o condiciones cercanas al mismo aun cuando los sistemas correspondientes estén lejos de él. Segundo, se invocan con frecuencia conceptos termodinámicos en la esperanza de encontrar criterios objetivos, no antropocéntricos, para la evaluación de sistemas. No obstante, no existen criterios únicos para la definición de fronteras y sistemas de referencia, ambos necesarios para un análisis termodinámico. Tercero, al abarcar la ecología estructuras históricas no asociadas a los mecanismos de estricta transmisión biológica, como es el caso de las culturales en sentido muy amplio, hace que lo que se ha denominado la intersección con intereses humanos le confiera una dimensión más amplia e

imprecisa.

Información. Tratándose de un concepto tan amplio y evasivo, no se pretende dar aquí una definición del mismo, pudiendo referirse en tal caso a la bibliografía (Jurquin, 1973; Feistel y Ebeling, 1989; Volkenstein, 1988; Margalef, 1995).

A lo que sí se hará referencia es a las características de esta cantidad que, al igual que la masa y la energía, no existe por sí sola, sino como una propiedad de estado de cualquier sistema físico llamado el portador de la información. Tal estado se considera como un portador de información únicamente en las situaciones en las que origine, controle, realice o provoque una acción, y no solamente una vez, sino en forma repetida. Por lo que, debe existir un dispositivo que interpreta la información llamado el intérprete, procesador, lector o receptor y ejecuta el mensaje recibido en forma de una acción. Si esta acción o proceso se valora de alguna manera, como el comportamiento en la ecología o en la sociedad, al valor se le puede llamar el valor de la información. Por eso es claro que esta clase de información no puede asociarse a una sola secuencia (mensaje) dada, sino únicamente a la secuencia en su contexto (intérprete) (Feistel y

Ebeling, 1989).

Dada la gran similitud entre la cantidad de información, medida introducida en la teoría de la información por Shannon, y la interpretación que de la entropía física, derivada de la segunda ley de la termodinámica hizo Boltzmann (Volkenstein, 1988), han surgido no pocas confusiones (Wicken, 1989). Así por ejemplo, a las diferentes configuraciones de energía y materia dispuestas en el espacio u ordenadas en serie en el tiempo se les considera como una especie de información, o negentropía ("entropía negativa") o antientropía, como se le llama en ocasiones, que puede convertirse en una medida de la organización, dependiendo de la forma como se calcule. B.C. Patten, ecólogo norteamericano, propone un punto de vista, de amplia aceptación, según el cual la información representa la incertidumbre que se reduce y las restricciones que crecen (Patten, Straskraba, Jorgensen, 1995), convirtiéndose así en un concepto central para definir los atributos propios de los ecosistemas.

² PATTEN, B.C.; STRASKRABA, M. and JORGENSEN, S.E. Ecosystem emerging: 1. the conservation principle. Aún sin publicar. Comunicación personal con el Dr. Patten, 1995.

Los aspectos principales acerca de la información, así entendida, y las leyes de conservación son:

1. las leyes de conservación para materia y energía fijan como soporte en el sentido de ser necesario pero no suficiente un conjunto de "alfabetos" físicos que cifran toda la realidad,
2. a partir de estos alfabetos, puede generarse la información en la forma de "vocabularios" y "sintaxis",
3. aunque los alfabetos, siendo físicos, son conservativos, la información que puede formarse de ellos es no conservativa.

En conclusión: la información, que es no conservativa, tiene su base física en las leyes de conservación de la masa y la energía.

No equilibrio. Los conceptos desarrollados en termodinámica de no equilibrio son particularmente apropiados para el análisis de cambios en la organización y complejidad de sistemas abiertos, de los que los ecosistemas son un buen ejemplo. El concepto central en este estadio de la termodinámica es la velocidad de producción de entropía, conocida como la función de disipación, existiendo dos dominios

bien diferenciados: situaciones cercanas al equilibrio, y aquellas lejos del equilibrio (Peacocke, 1989).

El primero de los casos mencionados, dió lugar a la termodinámica lineal de procesos irreversibles (Prigogine, 1961), y en ella la entropía generada en el interior del sistema por unidad de tiempo es la suma de los productos de los flujos y las correspondientes fuerzas. En el estado estacionario, la producción de entropía en el sistema abierto debe contrarrestarse con el flujo de entropía a los alrededores. Los sistemas que se acercan al estado estacionario se caracterizan por una disminución en la producción de entropía (Prigogine, 1980). Aunque este "principio de la mínima entropía" se desarrolló inicialmente para sistemas físicos abióticos, más tarde se ha convertido en la piedra angular del análisis termodinámico de sistemas vivos (Schneider, 1988; Johnson, 1995). A. I. Zotin ha estudiado por varios años los aspectos cuantitativos del crecimiento de organismos y ha intentado elaborar una teoría termodinámica de la ontogenia. Considera que, en el sentido más general, los procesos involucrados en el crecimiento y desarrollo de organismos consisten de tres tipos de

fenómenos, que identifica como los flujos: cambios en el peso (crecimiento), la aparición de diferencias entre las distintas partes del sistema (diferenciación), y cambios en la forma y estructura del organismo (formación de la configuración); también identifica las fuerzas responsables de estos fenómenos y deduce las relaciones cuantitativas y las ecuaciones de importancia en la biología del desarrollo (Zotin, 1985).

En el caso de los sistemas lejos del equilibrio, dominio no lineal, éstos se pueden caracterizar por un potencial generalizado, el exceso de producción de entropía (Peacocke, 1989). Esta función puede servir como una medida de los cambios en la estructura y estabilidad de un sistema. Su aplicabilidad a sistemas vivos es, sin embargo, limitada, en particular por la falta de suficientes datos para cálculos significativos. Aún cuando se dispusiera de esos datos, no es explícita la forma en la que pueden emplearse para evaluar los cambios en la estructura de un sistema con respecto a la valoración que se haga en el interior del mismo de los flujos resultantes de materia y energía. Todo lo que puede decirse es que aumentos en la complejidad de un sistema están asociados con un incremento en la producción global de la entropía. Los ecosistemas, por

ejemplo, son considerados como estructuras de no equilibrio, abiertas a flujos de materia y energía, que, a medida que crecen y se desarrollan, aumentan la disipación total, creando estructuras y procesos que ayudan en la degradación de la energía; puede asumirse que en el clímax alcanzan la mayor eficacia en la degradación de la energía suministrada (Schneider y Kay, 1994). Las diferencias entre las velocidades de producción de entropía antes y después de una perturbación al sistema, tales como las influencias antropogénicas sobre la estructura y el funcionamiento del mismo, pueden emplearse para evaluar su sostenibilidad desde una perspectiva puramente física (Hannon, Ruth, Delucia, 1993).

Exergía. Ya se había juzgado como inexacta la expresión: "la energía es una capacidad para realizar trabajo". El aire de la atmósfera, por ejemplo, posee una energía muy grande; sin embargo, su capacidad para realizar trabajo es mínima. Para medir la parte de la energía de un sistema que efectivamente puede convertirse en trabajo, surgieron en termodinámica conceptos como las energías libres y la exergía. Esta última, particularmente, ha encontrado gran acogida entre algunos ecólogos interesados en el desarrollo de una nueva generación

de modelos de ecosistemas dinámicos estructurales que cambian parámetros, incluyendo la composición de especies, con el tiempo (Jørgensen, 1992).

La exergía es una medida de la energía libre de un sistema con referencia a su ambiente. Al contrario de la energía, no es una cantidad conservativa, sino que se va perdiendo gradualmente desde la fijación por los productores primarios hasta el destino último (Christensen, 1995). Expuesto en otros términos, la exergía expresa la energía con una medida incorporada de la calidad; da cuenta de los recursos naturales y puede considerarse como un combustible para cualquier sistema que convierta energía y materia en un proceso metabólico.

S.E. Jørgensen adapta el concepto de exergía y emplea como referencia "la sopa inorgánica", el estado de equilibrio termodinámico que caracterizó la tierra hace millones de años. El uso repetido de "tanteo y error" encontró nuevas trayectorias para crear organización y alejarse más y más del equilibrio termodinámico. La exergía representa, de este modo, la separación de la "sopa inorgánica" en términos de energía (Jørgensen, 1992). Como se sabe que el

ecosistema, debido a los flujos de energía que lo atraviesan, tiene la tendencia a desarrollarse lejos del equilibrio termodinámico, degradando más energía a través de la aparición de nuevas rutas, pero adquiriendo mayor complejidad, representada en mayor número de estructuras e interacciones, puede decirse que los ecosistemas tienden a desarrollarse para alcanzar niveles más altos de exergía.

CONCLUSION

Las leyes de la termodinámica establecen límites para la eficiencia en las conversiones energéticas y de materia, relacionando el uso de éstas a la información, el orden y el conocimiento. La entrada última en sistemas ecológicos es el flujo de información que se origina en el sol, los almacenamientos de combustibles fósiles y nucleares y el calor desde el corazón de la tierra. El resultado de los procesos que tienen lugar en esos ecosistemas es el cambio temporal en el orden de los materiales que se dan naturalmente hacia estados de mayor valor, como es el caso de los compuestos complejos de carbono producidos, el código genético de los organismos... Estos cambios se logran a expensas de pérdidas significativas en la exergía, determinada por las bajas eficiencias de segunda ley de los

procesos del mundo real.

En biología, y en ecología en particular, la termodinámica puede contribuir a la comprensión de fenómenos como la adquisición de una determinada estructura, su eventual o virtual mantenimiento, su reproducción, su más o menos drástica metamorfosis o su destrucción; en otras palabras, a la comprensión de la evolución biológica. Asimismo, es la termodinámica la que ha dado la señal de alarma al pretendido, por algunos, desarrollo sin límite. La reflexión de P. T. Landsberg (citado por Atkins, 1992) es patética: "Constantemente degradamos estructuras ordenadas, de baja entropía tales como madera, metales y combustibles a materiales inservibles de alta entropía. Es cierto que la radiación solar genera nuevas estructuras de baja entropía, pero éste es un proceso lento".

BIBLIOGRAFIA

ATKINS, P. W. La segunda ley. Barcelona: Prensa Científica, 1992. 289p.

CHRISTENSEN, V. Ecosystem maturity towards quantification. *En: Ecological Modelling*. Vol. 77 (1995); 332p.

FEISTEL, R. and EBELING, W. Evolution of complex systems. Self organization, entropy and development. Dordrecht: Kluwer Academic, 1989. 300p.

HANNON, B.; RUTH, M. and DELUCIA, E. A physical view of sustainability. *En: Ecological Economics*. Vol. 8 (1993); p. 253-268.

JOHNSON, L. The far from equilibrium ecological hinterlands. *En: PATTEN, B.C. and JØRGENSEN, S.E.; ed. Complex Ecology: the part whole. Relationship in Ecosystems*. (1995); p. 51-103.

JØRGENSEN, S.E. Integration of ecosystem theories: a pattern. Kluwer. Dordrecht: Academic, 1992. 253p.

JURGUIN, Y. Bueno, ¿y Qué?. Moscú: MIR, 1973. 84p.

MARGALEF, R. Planeta azul, planeta verde. Barcelona: Prensa Científica, 1992.

MARGALEF, R. Information theory and complex ecology. *En: Complex Ecology: The PartWhole. Relationship in Ecosystems*. (1995); p.40-50.

PEACOCKE, A. R. An Introduction to the physical chemistry of biological organization. Oxford: Oxford University, 1989. 350p.

PRIGOGINE, I. Introduction to thermodynamics of irreversible processes. New York: John Wiley, 1961. 334p.

_____. From being to becoming. New York: W. H. Freeman, 1980. 90p.

RUTH, M. Information, order and knowledge in economic and ecological systems: implications for material and energy use. *En: Ecological Economics*. Vol.13 (1995); p.99-114.

SCHNEIDER, E. D. Thermodynamics, ecological succession and natural selection. Cambridge: MIT, 1988. 208p.

SCHNEIDER, E. D. and KAY, J. J. Complexity and thermodynamics: towards a new Ecology. *En: Futures* Vol. 24, No. 6 (aug., 1994).

SCHRÖDINGER, E. ¿Qué es la vida? 3ed. Barcelona: Tusquets Editores, 1988. 85p.

VOLKENSTEIN, M. V. Biophysics. Moscú: Editorial MIR, 1988. 285p.

ZOTIN, A. I. Thermodynamics and growth of organisms in ecosystems. *En: Canadian Bulletin for Fishing Aquatic Science*. Vol. 213 (1985); p.27-37.