

C O M
P L E
X U S

Revista de Complejidad, Ciencia y Estética

FUNDAMENTOS DE LA TERMODINÁMICA DEL NO EQUILIBRIO PARA UN NUEVO SABER AMBIENTAL

Anunziata Elisa Di Salvo

Universidad Pedagógica Experimental Libertador
Maracay, Venezuela
aedisalvo@hotmail.com

FUNDAMENTOS DE LA TERMODINÁMICA DEL NO EQUILIBRIO PARA UN NUEVO SABER AMBIENTAL¹

Anunziata Elisa Di Salvo

Universidad Pedagógica Experimental Libertador
Maracay, Venezuela
aedisalvo@hotmail.com

Resumen

La problemática ambiental ha sido un tema de debate en diferentes instancias, tanto académicas, como científicas y políticas, y el surgimiento de la misma ha estado indudablemente ligada al desarrollo científico y tecnológico, desarrollo que conllevó a logros materiales cada vez más abundantes y a la obtención de medios más eficientes para satisfacer las necesidades humanas. En este contexto, la educación pasa a ser un elemento clave para el desarrollo de una sensibilidad creciente hacia el ambiente, que conlleve a entender y rediscutir la relación hombre-naturaleza. Sin embargo, desde el hecho educativo es necesario trascender el simple cuestionamiento del comportamiento de la sociedad de la abundancia y del progreso y reclamar la reformulación del paradigma del conocimiento en el que se ha fundamentado la educación ambiental. Desde esta perspectiva, se demanda, entre otras cosas, la reconstrucción del conocimiento, el diálogo y la integración de saberes, aspectos que permitirían trascender la reducción y compartimentalización del conocimiento característico de la ciencia occidental. En este contexto en la presente investigación se realiza una revisión de algunos conceptos de carácter más complejos y sistémicos, los cuales consideramos que sin duda alguna deben incorporarse en pro de un saber ambiental

¹ El presente artículo es una versión revisada de la ponencia de la autora en el 4º Seminario Bienal Internacional acerca de las Implicaciones Filosóficas, Epistemológicas y Metodológicas de la Teoría de la Complejidad, Celebrado en La Habana, Cuba, del 15 al 18 de enero, 2008.

completo, coherente y responsable. Entre ellos, destacan los derivados de la Termodinámica del no equilibrio, disciplina que se desplaza del modelo inerte inanimado y se acerca al mundo de lo biológico y ofrece la visión de un mundo diverso, abierto y pluralista. En el estudio de los sistemas lejos del equilibrio, las antiguas leyes de la causalidad aparecen ahora como situaciones limitativas y únicamente aplicables a sistemas idealizados. La ciencia de la complejidad conduce a una concepción completamente diferente. Conceptos como atractores, bifurcación, irreversibilidad y contingencia son sólo algunos de los nuevos elementos que deben ser considerados para interpretar la dinámica de los sistemas naturales.

Palabras clave: *educación ambiental, bifurcación, complejidad, inestabilidad, termodinámica del no equilibrio, saber ambiental.*

1. Introducción

En la actualidad, la relación hombre-naturaleza se encuentra en revisión desde diversos puntos de vista tales como el filosófico, el ético y el científico; la diferencia está en el énfasis y la intención del autor. La ciencia permite y se quiere intervenir desde una posición armónica y conocente.

La ecología como disciplina científica es una perspectiva a través de la cual se puede estudiar esa relación hombre-naturaleza. En este sentido, encontramos, por ejemplo, la vertiente de la ecología profunda, citada por Capra (1998), la cual reconoce "... la interdependencia fundamental entre todos los fenómenos y el hecho de que, como individuos y como sociedades, estamos inmersos en (y finalmente dependientes de) los procesos cíclicos de la naturaleza" (p. 28). Tenemos entonces, que desde la percepción de la ecología profunda, el hombre no está separado de su entorno natural, y el mundo es considerado como una red de fenómenos fundamentalmente interconectados e interdependientes, y no como

FUNDAMENTOS DE LA TERMODINÁMICA DEL NO EQUILIBRIO PARA UN NUEVO SABER AMBIENTAL

una colección de objetos aislados. El presente trabajo se enmarca en la visión paradigmática de esta vertiente, por lo que se asume la ecología como ciencia compleja con todas las implicaciones que ello conlleva.

Epistemológicamente, la complejidad se refiere a mantener o retener juntas varias partes (Jost, 1998). En este sentido, la ecología no sólo estudia las determinaciones e influencias físicas surgidas del biotopo, o las interacciones entre los diversos seres vivientes que constituyen la biocenosis, sino que se fundamenta como la ciencia de las interacciones organizadoras entre cada uno y todos los constituyentes físicos y vivientes de los ecosistemas. Desde esta perspectiva, encontramos entonces la dinámica de la parte y el todo, la parte que bajo ciertas condiciones inunda al todo y donde el todo así constituido determina la conducta de la parte. Es la heterogeneidad en los vínculos de las partes que da sentido a la identidad versus la segmentación o separación.

Tal como sugiere Heisenberg, citado por Martínez (1993), “el método no puede separarse de su objeto”, por lo que entendemos que la termodinámica ofrece un punto de arranque para comprender la complejidad ecológica, al considerarla como aproximación, como una entrevista a lo ecológico, al mundo de las relaciones, como quién aporta instrumentos (especialmente conceptuales) a fin de construir nuevos conceptos de una ciencia de la complejidad que está generándose.

Los sistemas conservativos descritos por la dinámica clásica, como el péndulo ideal de oscilación eterna, la trayectoria de los planetas o las máquinas simples de movimiento perpetuo, simulan un ‘ideal’ que el sistema dinámico realizará. Las trayectorias dinámicas son deterministas y cada constituyente del sistema no deja de repetir, bajo forma equivalente, un estado inicial (Alegría y Gregory, 1992). Las leyes universales de la dinámica de las trayectorias son de esta manera conservativas, reversibles y deterministas (Prigogine y Stengers, 1990).

La termodinámica, nacida en el siglo XIX, define un sistema no como en dinámica clásica, por la posición y velocidad de sus constituyentes, sino a través de un conjunto de parámetros macroscópicos. Esos parámetros definen la composición del sistema y sus relaciones con el resto del mundo, definido como medio. De esta manera es posible, por medio de las condiciones de contorno,

intervenir sobre un sistema ejerciendo una acción mecánica, térmica o química. Ya no se trata, como en dinámica clásica, de observar una evolución y predecirla en función de los efectos de las interacciones entre los elementos de un sistema, sino de actuar sobre el sistema, de prever sus reacciones a una restricción impuesta.

En su evolución, la termodinámica del equilibrio pasa de sistemas cerrados al estado estacionario, y más adelante llega a la concepción de los sistemas fuera del equilibrio, ambos relacionados con sistemas abiertos. De esta manera, nuevas realidades y nuevos fenómenos son observados y admiten transferencia a la conducta biótica. Nos apartamos del mundo predicho y nos acercamos al mundo previsto (Morin, 1986).

En este contexto, para los sistemas biológicos, climáticos, etc., la evolución en el tiempo la asociamos con un incremento de organización y con la aparición de estructuras cada vez más complejas: la evolución no genera estados equivalentes, el futuro no se presenta ya como una repetición del pasado, y las transformaciones que ocurren marcan la irreversibilidad de los procesos en marcha.

En su devenir, la termodinámica abandona los sistemas artificialmente separados del mundo, y en el estudio de los procesos irreversibles descubre que los flujos que atraviesan ciertos sistemas fisicoquímicos que los alejan del equilibrio, pueden alimentar fenómenos de auto-organización espontánea, rupturas de simetría, evoluciones hacia una complejidad y una diversidad crecientes. Estamos ahora más cerca de entender la inestabilidad intrínseca de la naturaleza, en la cual las fluctuaciones insignificantes pueden, si se producen en determinadas circunstancias, invadir todo el sistema, y engendrar un nuevo régimen de funcionamiento y organización.

Desde este punto de vista, podemos afirmar que la termodinámica nos brinda un marco de referencia en el cual insertar el estudio de los fenómenos ecológicos, ya que ofrece instrumentos conceptuales que permiten acercarnos con más detalle a la complejidad de los mismos, pues nos permite prever (en lugar de predecir) la conducta del sistema: nos presenta escenarios posibles de su evolución y abre al análisis una rica variedad de posibilidades.

FUNDAMENTOS DE LA TERMODINÁMICA DEL NO EQUILIBRIO PARA UN NUEVO SABER AMBIENTAL

En el presente trabajo se seleccionarán los instrumentos conceptuales que ha elaborado la fisicoquímica, de amplio margen de aplicación y de carácter general, los cuales nos permiten estimar cualitativamente el devenir de los ecosistemas. El propósito central es, por lo tanto, contribuir a la difusión de algunos criterios científicos ante la comunidad educativa, para ayudar a la construcción de una intervención humana más consciente con el ambiente y con la pretensión de que estos conceptos, cruciales para el desarrollo de nuestras sociedades, pasen a formar parte de una cultura general accesible a todos los estratos sociales.

Fundamentos

La acción transformadora que el hombre ha venido realizando sobre el ambiente reviste, en estos momentos, nuevas dimensiones que ponen en evidencia el profundo impacto que la tecnósfera ejerce sobre el planeta.

La dinámica del desarrollo económico ha promovido una relación hombre-naturaleza que conduce al deterioro de los ecosistemas, a la reducción de la biodiversidad, al agotamiento de los recursos naturales y a un aumento de la concentración demográfica en áreas reducidas. Al respecto, Fergusson (1994), señala que el consumismo que se ha imprimido a la sociedad ha terminado por exacerbar la oposición naturaleza-desarrollo económico, la cual nos ha sumido en una profunda crisis ambiental, económica, social, política y ética.

La intervención humana pasa a ser una fuerza geológica de gran dimensión capaz de modificar drásticamente la Tierra. Este inmenso potencial desarrollado, ha dado paso en los últimos años al despertar de una profunda sensibilidad mundial sobre los problemas medioambientales. De una conducta puntual y remedial, se viene desarrollando todo un espacio paradigmático cada vez más profundo que nos está obligando a replantear nuestra relación con la naturaleza.

Esta revisión de la relación hombre-natura necesariamente debe abordar los cambios paradigmáticos que se han gestado en el seno de la misma ciencia. El paradigma científico dominante, que hoy está siendo profundamente cuestionado, ha enarbolado ideas y valores que se han arraigado en nuestra cultura,

entre los cuales se pueden mencionar: la visión del universo como un sistema mecánico compuesto de piezas, la vida en sociedad como una lucha competitiva por la supervivencia y la creencia en el progreso material ilimitado a través del crecimiento económico y tecnológico. En esta percepción de la realidad, la ciencia logró implantar premisas que implican una naturaleza inerte y pasiva: por mucho tiempo la naturaleza fue considerada como un autómata manipulable y sujeta a leyes matemáticas que determinan su pasado y su futuro. Sin embargo, nos encontramos en estos momentos ante una situación diferente, pues el cambio que se está produciendo en el seno de la misma ciencia, nos está llevando a renovar nuestro concepto de la relación del hombre con su entorno natural y a que empecemos a concebir la existencia humana enmarcada dentro de una relación dinámica con la naturaleza, lo cual nos permitirá utilizar sus potencialidades e intervenir, dirigir u orientar sus procesos de manera que no vulnere su capacidad autorreguladora, y por ende evolutiva. Esto exige, como plantea Fergusson (o .cit.), considerar a los ecosistemas como unidades integrales de la naturaleza y no sólo como proveedores de recursos materiales para satisfacer nuestras necesidades.

Esta situación obliga a la búsqueda de herramientas conceptuales que permitan abordar el estudio de los sistemas ecológicos bajo una nueva perspectiva. La sensibilidad del sistema a las perturbaciones a las que se somete, la comprensión de las relaciones entre los miembros de los ecosistemas y los procesos interdependientes que se generan en ellos, son fuentes de interrogantes que no podemos dejar de revisar y cuyas respuestas podemos encontrar a partir del pensamiento complejo.

Los conceptos que se derivan de esta nueva visión de interpretar los ecosistemas, implican cambios en la misma base de nuestra cultura, cambios fundamentales que deben involucrar al sistema educativo, ya que éste es el vehículo apropiado para que la información derivada de la ciencia sea incorporada en un marco de conocimiento general desde donde la educación entregue al ciudadano, sujeto de conocimiento, las herramientas conceptuales necesarias para comprender, procesar y utilizar la información, permitiéndole una mejor capacidad de participación en la toma de decisiones tanto individuales como colectivas que

FUNDAMENTOS DE LA TERMODINÁMICA DEL NO EQUILIBRIO PARA UN NUEVO SABER AMBIENTAL

afecten a su presente y su futuro. Así será posible el desarrollo de una ciudadanía más informada, activa y responsable en la construcción de una conciencia ecológica-social.

Reflexiones Conceptuales

A raíz del surgimiento de la termodinámica del no equilibrio, encontramos importantes herramientas conceptuales que nos permiten abordar la realidad del mundo que nos rodea desde una perspectiva diferente.

La ciencia clásica nos ofreció la visión de un mundo estable y predecible, descrito por leyes deterministas y reversibles, centrando la atención en la constancia de los fenómenos. El estudio de los sistemas se ha centrado en el equilibrio, en el cual las perturbaciones y/o fluctuaciones que actúan sobre el mismo son amortiguadas (Principio de Le Chatelier) y en el que la evolución del sistema es entendida como repetición de conductas anteriores. Esto nos ha conducido a una visión del mundo en que la conservación se impone a la renovación, frente al cambio, la única respuesta es la permanencia.

La concepción mecanicista de la ciencia clásica nos ofreció la confortable idea de que sabíamos (o al menos podíamos llegar a saber) cuáles eran las causas de los fenómenos que ocurrían. Fue eficaz para explicar fenómenos que funcionan como simples máquinas, mas no para explicar fenómenos como el desarrollo, la evolución de sistemas hacia niveles de complejidad creciente, o cómo pequeñas fluctuaciones en un sistema pueden llegar a generar grandes cambios.

Frente a esta forma de abordar la realidad, la termodinámica del no equilibrio nos ofrece la visión de un mundo diverso, abierto y pluralista. El descubrimiento de estructuras en condiciones de no equilibrio, la inestabilidad de partículas elementales y el hecho de que el universo está en continua expansión, obligan a una reconceptualización que lleva a desmontar la visión del mundo que ofreció el paradigma clásico.

En el estudio de los sistemas lejos del equilibrio, encontramos que las fluctuaciones, en lugar de amortiguarse, se amplifican pudiéndose instalar en el sis-

tema y evolucionando él mismo hacia nuevos estados, es decir, el sistema no regresa a las condiciones reinantes antes del cambio, sino que surgen nuevas estructuras como respuestas a las condiciones dadas.

En el no-equilibrio, la evolución se considera como un proceso que conduce a estructuras más complejas, de orden superior. Esto implica que las leyes de la causalidad aparecen ahora como situaciones limitativas, aplicables únicamente a sistemas idealizados. Actualmente, la ciencia de la complejidad conduce a una concepción completamente diferente, pues nos muestra cómo en lugar de permanecer apresados en un universo cerrado que funciona como un reloj mecánico, nos encontramos en un universo mucho más flexible en el que siempre existe la posibilidad de que alguna inestabilidad conduzca a algún nuevo mecanismo. Tenemos entonces realmente un universo abierto.

La revisión de conceptos fundamentales de la termodinámica del no equilibrio, como atractores, bifurcación, irreversibilidad o contingencia son sólo algunos elementos que debemos tomar en cuenta para interpretar la dinámica de los sistemas ecológicos.

Esta manera de abordar la realidad plantea nuevos caminos que permiten un renovado diálogo con la naturaleza, en la cual la complejidad va directamente unida a la inestabilidad.

Herramientas: Dinámica de Estabilidad e Inestabilidad en los Sistemas Naturales

Los sistemas naturales son sistemas abiertos que intercambian continuamente materia y energía, por lo tanto son sistemas dinámicos en los cuales cualquier factor puede producir cambios en las condiciones existentes.

El estudio de los sistemas abiertos evidencia una gama de conductas que pueden surgir bajo condiciones de no equilibrio, y que se ponen de manifiesto cuando el sistema se encuentra sometido a un vínculo externo que lo mantiene alejado del equilibrio, y su dinámica viene descrita por leyes no lineales. Estos sistemas son afectados por la irreversibilidad, ya que al producirse una fluctuación

FUNDAMENTOS DE LA TERMODINÁMICA DEL NO EQUILIBRIO PARA UN NUEVO SABER AMBIENTAL

o un cambio brusco en el sistema aparecen estructuras emergentes que se adaptan a las nuevas condiciones. Los ecosistemas son vulnerables, ya que son altamente sensibles, pero esta sensibilidad no puede separarse de su flexibilidad; por lo tanto, el ecosistema es capaz de evolucionar ante la irrupción perturbadora de lo nuevo.

La tendencia profunda de los ecosistemas, en el análisis ecológico hasta el momento, es un estado estacionario u homeostático. Pero esta tendencia es solamente ideal en nuestro planeta, pues éste tiene una historia física, geológica, climática profundamente dinámica. En este movimiento los ecosistemas se transforman, se desplazan. Todos los cambios se han efectuado a través de estados estacionarios sucesivos que han surgido a raíz de otros cambios. De este modo, la naturaleza tiende al estado estacionario a la vez que evoluciona.

En esta evolución, hay un aumento de complejidad creciente, la cual viene acompañada de un aumento de orden, desorden y organización (Morin, 1988). Un desarrollo de complejidad no es necesariamente un aumento cualitativo de diversidad, y el desarrollo de la diversidad obedece a principios complejos; es decir, no solamente desde el punto de vista cuantitativo. Sin embargo, es necesaria la diversidad para los ecosistemas, y ésta puede estar unida en ciertas condiciones a la complejidad. La gran diversidad de los constituyentes de un ecosistema constituye un factor de desarrollo de sus cualidades de resistencia a las agresiones y perturbaciones. Ahora bien, esta resistencia puede darse de dos formas diferentes: cuando el ecosistema es capaz de amortiguar la perturbación una vez instalados los perturbadores, o cuando puede restaurar su identidad después de grandes trastornos.

En este sentido Morin (o. cit.), plantea dos aspectos fundamentales para los ecosistemas. El primero establece que las leyes de las organizaciones complejas autoorganizativas no son de equilibrio, sino de desequilibrio, de dinamismo estabilizado; el segundo aspecto, formula que la inteligibilidad del sistema ha de encontrarse no solamente en él mismo, sino también en su relación con el ambiente; además, esta relación no es una simple dependencia, sino que es constitutiva del sistema mismo.

Podemos afirmar entonces que la realidad de la inteligibilidad de los eco-

sistemas está tanto en el vínculo como en la distinción entre el sistema abierto y su ambiente. En este sentido, debemos considerar que los ecosistemas:

- Establecen un intercambio con el ambiente.
- Este intercambio es esencial para mantenerse el sistema, ya que del mismo depende su capacidad reproductiva o de continuidad, así como su capacidad de transformación.

Ciclos y Redes

Al basar nuestra atención en los ecosistemas, no debemos olvidar su naturaleza cíclica, ni la interdependencia que se establece entre todos y cada uno de sus miembros, la cual produce una complicada red de relaciones en la que el éxito de la comunidad depende de cada uno de sus individuos y al contrario, el éxito de cada individuo depende de la comunidad como un todo.

Para comprender las interrelaciones que se establecen, es necesario cambiar nuestra percepción y utilizar el análisis del todo, pasar de objetos a relaciones. No podemos llegar a entender la complicada red de relaciones a partir de la clásica visión analítica de descomponer el todo en partes y estudiar desde las partes las propiedades del conjunto. Si aceptamos que los sistemas ecológicos son sistemas complejos, debemos entender que en la complejidad, como sugiere Jost (1998), la sumatoria de las partes no es igual al todo que se pretende conocer o aprehender.

Las cadenas lineales de causa-efecto se dan muy raramente en los ecosistemas. Las relaciones entre los miembros de una comunidad ecológica son no-lineales e incluyen múltiples bucles de retroalimentación. Cualquier perturbación no tendrá un único efecto, sino que sus consecuencias repercutirán en expansión. De hecho, puede amplificarse por circuitos de retroalimentación independiente, capaz de llegar a ocultar la fuente original de la perturbación. Tenemos dos tipos de realimentación: la negativa que regula, y la positiva que amplifica. Las propiedades de la realimentación, sobre todo la renovación constante, confieren al sistema características conocidas en su conjunto como autopoiesis.

FUNDAMENTOS DE LA TERMODINÁMICA DEL NO EQUILIBRIO PARA UN NUEVO SABER AMBIENTAL

Las estructuras autopoieticas las podemos encontrar en todo un abanico de sistemas abiertos, desde estructuras disipativas químicas, como la reacción BZ, hasta sistemas de gran complejidad como los seres vivos, entre los cuales se encuentran los ecosistemas.

Una característica de los sistemas autopoieticos es su capacidad de autorregulación, la cual les concede cierta autonomía y les confiere una identidad propia que mantienen continuamente.

Si centramos nuestra atención en los ecosistemas, observamos que éstos (al igual que el resto de las estructuras autopoieticas) están inmersos en un ambiente que constituye un ámbito alejado del equilibrio constituido por flujos de energía que involucran luz solar, alimento, calor, agentes químicos, etc.. En este contexto, las estructuras autopoieticas tienen un límite, una frontera definida, pero la cual es abierta y conecta al sistema con el mundo circundante con una extrema complejidad. En esta relación entre sistema y ambiente se produce una realimentación. Tal como lo plantea Lovelock (1993), el planeta mismo es una forma de vida creada por realimentación interconectada. Según su hipótesis de Gaia, las especies de la Tierra están coordinadas de tal modo que nuestro planeta es una gran estructura autopoietica.

Los instrumentos para la autorregulación son muchos, y han evolucionado con el tiempo. Como ejemplo de un autorregulador negativo, tenemos el caso de 'Emilia', plancton oceánico que emite un gas sulfuroso a la atmósfera. Una reacción química transforma el gas en partículas alrededor de las cuales se condensa el agua dando origen a la formación de nubes. Éstas reflejan la luz solar, que de otra manera habrían llegado a la superficie de la Tierra calentándola. Sin embargo, si la temperatura desciende demasiado, el frío reduce la cantidad de plancton y con él la formación de nubes, con lo cual asciende la temperatura. 'Emilia' opera como un termostato para mantener la temperatura terrestre dentro de ciertos límites.

Mantener un proceso dentro de límites de estabilidad dinámica supone por consiguiente una alternancia de retroalimentación positiva y negativa, la cual determina la amplitud de las oscilaciones que se dan en el seno del sistema.

En los ecosistemas, la realimentación no lineal constituye una pieza clave a considerar, ya que la misma puede transformar una actividad simple en una compleja danza de situaciones. En este sentido, la dinámica no lineal que se registra en los ecosistemas no puede ser abordada a partir del estudio de modelos lineales, los cuales son poco confiables para la predicción. Los pronósticos no funcionan, ya que los modelos no pueden tener en cuenta la interacción total de elementos de un sistema dinámico sensible como los ecosistemas, en los cuales hay ciclos y bucles que se rompen y se reengarzan en otra red, dando la sensación de que el fenómeno es completamente normal.

En vez de tratar de descifrar las cadenas de causalidad, hay que buscar los nódulos donde se unen los bucles de realimentación y procurar identificar el mayor número posibles de bucles en el sistema, de manera de aprender acerca de los puntos críticos del mismo y por ende de su homeostasis. De manera que no se trata de controlar al sistema, sino conocer su funcionamiento para interactuar con él más armoniosamente.

Fuerzas y Flujos

En la revisión de conceptos que proporciona la termodinámica, encontramos que la producción de entropía se expresa de manera simple y general en términos de las llamadas fuerzas y flujos termodinámicos asociados a la ocurrencia de un conjunto de procesos irreversibles. A cada fuerza le corresponde un flujo: ejemplos sencillos de estas cantidades son el gradiente térmico y el flujo de calor, el potencial eléctrico y la corriente eléctrica, el gradiente de densidad y el flujo de masa, entre otros. En situaciones próximas al equilibrio, flujos y fuerzas termodinámicas se relacionan entre sí por leyes empíricas lineales. En un proceso de complejidad arbitraria, el flujo se expresa como una combinación lineal de todas las fuerzas. Esta formulación permite definir el concepto de estado estacionario, de no equilibrio y de determinar los criterios de estabilidad y evolución a los que se refiere.

FUNDAMENTOS DE LA TERMODINÁMICA DEL NO EQUILIBRIO PARA UN NUEVO SABER AMBIENTAL

Para sistemas termodinámicos alejados del equilibrio, como los ecosistemas, podríamos hablar también de flujos y fuerzas implicados en los procesos irreversibles que en ellos se generan. Sin embargo, el énfasis no debe realizarse en la fuerza, ya que éste no es el parámetro principal que permita adoptar una conducta a priori en nuestra relación con la naturaleza. La susceptibilidad del ecosistema se va a desarrollar por el flujo, el cual conlleva a una respuesta de la sensibilidad del ecosistema.

La comprensión de los ecosistemas está íntimamente relacionada con las tasas de circulación dentro del sistema escogido. En los ecosistemas, se presenta flujo de energía y materiales que atraviesan las fronteras hacia el interior y el exterior del mismo. Cuando se describen estos flujos, se describe el ambiente del ecosistema. En los ecosistemas se dan circuitos acuosos, gaseosos, minerales, etc., que caracterizan a un tipo determinado de flujo, y es precisamente la calidad de éste el que influye sobre la sensibilidad del ecosistema y por ende sobre sus miembros. Si el flujo se sale del ecosistema, se generan respuestas en los individuos, así podemos observar cómo los animales se desplazan del nicho que ocupaban y en las plantas se observan cambios somáticos particulares, de manera de adecuarse a las fluctuaciones, variaciones que se dan en su ambiente.

Ahora bien, al considerar el flujo, debemos centrar nuestra atención en varios aspectos fundamentales como son el tipo de flujo (factor intensidad), la cantidad de flujo (factor cantidad) y el ritmo con el que éste ocurre.

Considerando a las especies que pueden moverse, debemos en primer lugar tener presente que una especie tiende a ocupar todo el espacio físico que se le presenta disponible. Cuando ocurre un flujo de alguna especie, se debe prestar especial atención a cuál es la especie que está migrando y qué lugar ocupaba en el ecosistema, ya que ésta es quien va a desencadenar toda la dinámica de cambio. Por ejemplo, si la especie que migra ocupaba un papel de regulador en el ecosistema, al darse el flujo de la misma, todas las especies que dependen de ella emigrarán conjuntamente con ella, y las especies que se encuentran en un nivel inferior en la escala del ecosistema, tenderán a ocupar todo el espacio físico que era regulado por la especie que ya no se encuentra. A corto o mediano

plazo, puede ocurrir que la cantidad de ejemplares o la diversidad de especies mermen y el ecosistema pierda su flexibilidad ante la perturbación, desencadenándose así un proceso irreversible que puede conducir a la aniquilación del mismo.

No obstante, como se discutió anteriormente, sabemos que el flujo aparece cuando existe un gradiente, (en los sistemas fisicoquímicos, por ejemplo, el flujo de calor aparece por un gradiente de temperatura) y esta consideración también es válida en los sistemas ecológicos. Esto nos estaría indicando que si conocemos cuál es el flujo podemos, por lo tanto, tener una idea de cuál es el gradiente que está operando, y actuar en el sentido de disminuir la influencia del mismo y frenar de esa manera el flujo. Por otro lado, si conocemos el gradiente (natural o inducido) podemos prever qué flujo va a ocurrir, y ante esta situación, podemos actuar antes de que se desencadene el movimiento de la especie que es sensible al gradiente presente, y provocar en consecuencia que el ecosistema evolucione hacia un nuevo estado.

Es evidente que la crisis en los ecosistemas se acentúa por la acción del hombre. Estas crisis, resultantes de perturbaciones que influyen sobre el ecosistema, no sólo se han multiplicado peligrosamente, sino que al aumentar en número han producido efectos impredecibles y, por tanto, inesperados a escala planetaria. El flujo puede desencadenar que el problema abandone el ámbito local en el cuál se generó y pase a ser de carácter global. Así, por ejemplo, encontramos que el flujo de dióxido de carbono, resultado de la acción humana, ha desencadenado un cambio climático global: el efecto invernadero; la acción de los clorofluorocarbonados (CFC), cuyo resultado es la disminución de la capa de ozono, afecta a todo el planeta, o el intercambio de flujos sólidos (personas, materia, etc.) que puede generar la proliferación de enfermedades que pasen a tener carácter epidémico.

Conclusiones

Al revisar los conceptos fundamentales que proporciona la termodinámica del no-equilibrio encontramos herramientas conceptuales que permiten reconstruir nuestro diálogo con la naturaleza desde una perspectiva diferente. La teoría de los sistemas disipativos, las fluctuaciones y las bifurcaciones nos permiten pensar en otra posibilidad; ya no en considerar a la naturaleza en homeostasis eterna, sino en un equilibrio dinámico en tensión expandiéndose hacia una complejización creciente.

La evolución puede considerarse como un proceso que conduce hacia organismos crecientemente complejos y diversificados a través del nacimiento de nuevas estructuras disipadoras de orden superior. Esta nueva manera de ver los sistemas naturales plantea nuevos caminos de diálogo con la naturaleza, en la cual la complejidad está unida a la inestabilidad que es provocada por atractores extraños, los cuales engendran un nuevo tipo de régimen macroscópico en el cual aparecen estructuras disipativas dotadas de un gran orden en las que surgen correlaciones de largo alcance, en el cual el sistema actúa como un todo. Aquí la homogeneidad del espacio y la uniformidad del tiempo se pierden. A partir de la rama básica de la solución termodinámica del sistema, otras soluciones pueden ser obtenidas mediante inestabilidades sucesivas que tienen lugar cuando la distancia del equilibrio aumenta. Este tipo de inestabilidades puede estudiarse a partir de la teoría de las bifurcaciones, la cual introducirá la historia en el sistema. El sistema es susceptible al cambio, una fluctuación en vez de amortiguarse puede amplificarse, llegando a ser fuente de innovación y diversificación.

La ciencia debe proporcionar las herramientas necesarias para reelaborar el diálogo con la naturaleza, a fin de generar una conducta prevista a priori que ayude a armonizar las acciones que emprendemos frente a los problemas ambientales. No es posible seguir centrando nuestros esfuerzos en tratar de dar respuestas ante cambios fundamentales y potencialmente peligrosos que se han operado en el seno de la biosfera. Debemos contar con elementos que nos permitan comprender las relaciones ecológicas, apreciar su complejidad y su dinamismo. No podemos centrar nuestra atención tan sólo en los instrumentos tec-

nológicos con los cuales intervenimos sobre la naturaleza, sino de verificar el impacto que los mismos ejercen sobre el ambiente con el cual se quiere interactuar. La fe inquebrantable en el progreso, como consecuencia del desarrollo científico y tecnológico, ha constituido una utopía que ha llevado a la consecución de importantes logros para la humanidad, pero que también ha tenido sus desviaciones y ha producido efectos insospechados e indeseados sobre el ambiente.

Estos efectos podrían resumirse diciendo que el progresismo, mediante la aplicación de la ciencia y la tecnología, ha producido una degradación de la naturaleza de grandes proporciones. Nuestra misión como científicos y educadores es mediar con el conocimiento, el cual hasta ahora ha estado fundamentado en el racionalismo y empirismo y nos ha conducido a la premisa de que hay que aumentar el conocimiento para alcanzar el poder, el dominio sobre la naturaleza. En el cambio de nuestra relación con la naturaleza, deberíamos contemplar no sólo el desarrollo de aspectos científicos y técnicos de la humanidad, sino concebir también un desarrollo cuantitativo y cualitativo de valores éticos en el sentido más amplio.

En nuestra interacción con el ambiente debemos tomar en cuenta el conjunto de variables que se van a introducir, las cuales afectarán al sistema, y en el cual se generan una serie de posibles estados hacia los cuales evolucionar. En este sentido debemos introducir el concepto transversal de la multifactorialidad de los distintos escenarios ante la aplicación de una determinada tecnología, superando la premisa de utilizar la tecnología todo cuanto sea posible en nuestra relación con la naturaleza. A través de esta nueva visión de nuestra relación con ella, no podemos esperar predecir el estado futuro del sistema, sino que debemos ocuparnos por contar con elementos anticipatorios que permitan prever cuáles pueden ser los posibles escenarios hacia los que evolucionará el sistema frente a una perturbación o fluctuación. En este panorama, el determinismo no tiene cabida, pues el pasado y el futuro del sistema ya no juegan el mismo rol que antes; en la evolución, el sistema no regresa a conductas anteriores, sino que aparecen nuevos comportamientos, y es imposible predecir cuál de las posibles formas va a adoptar.

FUNDAMENTOS DE LA TERMODINÁMICA DEL NO EQUILIBRIO PARA UN NUEVO SABER AMBIENTAL

Este abanico de nuevas posibilidades que surgen del seno de la ciencia y que nos llevan a cambiar la óptica de interpretar a los sistemas ecológicos debe trasladarse a las comunidades, reconociendo la necesidad de que las generaciones actuales y futuras estén versadas en los conceptos que nos aporta la complejidad, a fin de lograr un ciudadano comprometido a tomar medidas individuales y colectivas para lograr el desarrollo de una sociedad sostenible. En este sentido, la educación debe asumir los nuevos desarrollos de la ciencia, pero no como repetidora, sino como generadora de cambios en un proceso continuo de amplia aplicación.

Evidentemente esto reclama una transformación del educador, quien no puede permanecer pasivo en su praxis diaria, centrando su acción en transmitir contenidos definitivos, que no admiten renovación. Es necesario que la nueva visión del mundo que nos ofrece la ciencia sea asumida en el salón de clases, lo cual requiere una preparación y actualización del docente, con la finalidad de que esté versado en los nuevos conceptos y enfoques y pueda transmitir a los jóvenes las nuevas ideas derivadas del seno de la ciencia, y promueva el pensamiento complejo necesario para enfrentar el dinámico cambio que se está gestando en el seno de la sociedad.

Si se ha de rescatar el ambiente y las perspectivas del ser humano que dependan de éste, el restablecer un diálogo con la naturaleza en el cual el hombre no se sitúe por encima de ella es primordial: en esta labor la educación tiene el compromiso de asumir su responsabilidad y generar los cambios necesarios para construir un espacio de reflexión en el cual el individuo tenga la oportunidad de integrar este nuevo concepto de conocimiento para incluirlo en su marco social y utilizarlo para resolver problemas, crear sistemas de valores y tomar decisiones en la gestación de una ciudadanía más informada, activa y responsable de su propio devenir.

Referencias bibliográficas

ALEGRÍA, H. y M. GREGORI: «La Evolución Química. Un punto de vista para la enseñanza de las ciencias naturales. Una revisión», UPEL-Maracay: Trabajo de ascenso no publicado, 1992.

CAPRA, Fritjof: *La Trama de la Vida*, Barcelona: Editorial Anagrama, 1998.

FERGUSON, A.: “Fundamentos de una gestión ambiental (II)”, *Ciencia al día*, 4.8 (1994).

JOST, J.: “On the Notion of Complexity”, *Theory Biosci*, 117 (1998): 161-171.

LOVELOCK, James E.: *Las Edades de Gaia. Una biografía de nuestro planeta vivo*, Barcelona: Tusquets Editores, 1993.

MARTÍNEZ, Miguel: *El paradigma emergente*, Barcelona: Ed. Gedisa, 1993.

MORIN, Edgar: *El método*, Tomo I, Madrid: Ed. Cátedra, 1986.

— *El método*. Tomo III. Madrid: Ed. Cátedra, 1986.

PRIGOGINE, Ilya e Isabelle STENGERS: *La nueva alianza: metamorfosis de la ciencia*, Madrid: Alianza Editorial, 1990.