

## Actividades para 1 semana

**Tiempo:** 23 al 27/03

**Temas:** Unidad 1: Teoría general de los sistemas y su aplicación en Ecología.

### Bibliografía:

Arnold, M y Osorio, F. 1998. Introducción a los conceptos básicos de la teoría general de sistemas Cinta moebio 3: 40-49 [www.moebio.uchile.cl/03/frprinci.htm](http://www.moebio.uchile.cl/03/frprinci.htm)

Significado de la teoría general de sistemas. Primera y segunda parte. Ludwing von Bertalanffy.

### Actividades:

1. ¿Cuál era el objetivo de la física clásica? ¿Cómo era considerada la biología a la luz mecanicista?
2. ¿Cuál es la concepción básica de la biología moderna? ¿en qué consiste?
3. A qué se refiere el texto cuando hace mención a la "generalización de una teoría".
4. ¿Porque señala el autor que en algunos casos debemos conformarnos con una explicación en principio? Cite un ejemplo biológico.
5. ¿Cuáles consideraciones lo conducen a proponer esta nueva disciplina científica llamada Teoría general de Sistemas?
6. ¿Cuál es el objetivo de la teoría general de sistemas? ¿En qué consiste dicha teoría?
7. Indique cuales son las metas principales de dicha teoría.
8. Ilustre la Teoría general de Sistemas con algunos ejemplos.
9. Uno de los conceptos básicos de la TGS es la complejidad, la cual considera como la cantidad de elementos de un sistema y sus potenciales interacciones. Explique dicho concepto con un ejemplo ecológico.

## Significado de la teoría general de sistemas. Primera Parte Ludwig von Bertalanffy

*La ciencia moderna se caracteriza por la especialización siempre creciente, impuesta por la inmensa cantidad de datos, la complejidad de las técnicas y de las estructuras teóricas dentro de cada campo*

### En pos de una teoría general de los sistemas

De esta manera, la ciencia está escindida en innumerables disciplinas que sin cesar generan subdisciplinas nuevas. En consecuencia, el físico, el biólogo, el psicólogo y el científico social están, por así decirlo, encapsulados en sus universos privados, y es difícil que pasen palabras de uno de estos compartimientos a otro.

A ello, sin embargo, se opone otro notable aspecto. Al repasar la evolución de la ciencia moderna topamos con un fenómeno sorprendente: han surgido problemas y concepciones similares en campos muy distintos, independientemente.

La meta de la física clásica era a fin de cuentas resolver los fenómenos naturales en un juego de unidades elementales gobernadas por leyes «ciegas» de la naturaleza. Esto lo expresaba el ideal del espíritu laplaciano que, a partir de la posición y momento de sus partículas, puede predecir el estado del universo en cualquier momento. Esta

visión mecanicista no se alteró —antes bien, se reforzó— cuando en la física las leyes deterministas fueron reemplazadas por leyes estadísticas. De acuerdo con la derivación por Boltzmann del segundo principio de la termodinámica, los acontecimientos físicos se dirigen hacia estados de máxima probabilidad, de suerte que las leyes físicas son esencialmente «leyes del desorden», fruto de acontecimientos desordenados, estadísticos. Sin embargo, en contraste con esta visión mecanicista han aparecido en las varias ramas de la física moderna problemas de totalidad, interacción dinámica y organización. Con la relación de Heisenberg y la física cuántica se hizo imposible resolver los fenómenos en acontecimientos locales; surgen problemas de orden y organización, trátase de la estructura de los átomos, la arquitectura de las proteínas o los fenómenos de interacción en termodinámica. Parecidamente la biología, a la luz, mecanicista, veía su meta en la fragmentación de los fenómenos vitales en entidades atómicas y procesos parciales. El organismo vivo era descompuesto en células, sus actividades en procesos fisiológicos y por último fisicoquímicos, el comportamiento en reflejos condicionados y no condicionados, el sustrato de la herencia en genes discretos, y así sucesivamente.

En cambio, la concepción organísmica es básica para la biología moderna.

Es necesario estudiar no sólo partes y procesos aislados, sino también resolver los problemas decisivos hallados en la organización y el orden que los unifican, resultantes de la interacción dinámica de partes y que hacen el diferente comportamiento de éstas cuando se estudian aisladas o dentro del todo. Propensiones parecidas se manifestaron en psicología. En tanto que la clásica psicología de la asociación trataba de resolver fenómenos mentales en unidades elementales —átomos psicológicos se diría—, tales como sensaciones elementales, la psicología de la Gestalt reveló la existencia y la primacía de todos psicológicos que no son sumas de unidades elementales y que están gobernados por leyes dinámicas. Finalmente, en las ciencias sociales el concepto de sociedad como suma de individuos a modo de átomos sociales —el modelo del hombre económico— fue sustituido por la inclinación a considerar la sociedad, la economía, la nación, como un todo superordinado a sus partes. Esto trae consigo los grandes problemas de la economía planeada o la deificación de la nación y el Estado, pero también refleja nuevos modos de pensar.

Este paralelismo de principios cognoscitivos generales en diferentes campos es aun más impresionante cuando se tiene en cuenta que se dieron independientemente, sin que casi nunca interviniera nada de la labor e indagación en campos aparte.

Hay otro aspecto importante de la ciencia moderna. Hasta no hace mucho la ciencia exacta, el corpus de las leyes de la naturaleza, coincidía casi del todo en la física teórica. Pocos intentos de enunciar leyes exactas en terrenos no físicos han merecido reconocimiento.

No obstante, la repercusión y el progreso de las ciencias biológicas, de la conducta y sociales parecerían imponer un ensanchamiento de nuestros esquemas conceptuales a fin de dar cabida a sistemas de leyes en campos donde no es suficiente o posible la aplicación de la física.

Semejante inclinación hacia teorías generalizadas es patente en muchos campos y de diversas maneras. Partiendo de la labor precursora de Lotka y Volterra, p. ej., se ha desarrollado una compleja teoría de la dinámica de las poblaciones, la lucha por la existencia y los equilibrios biológicos. La teoría opera con nociones biológicas tales como individuo, especie, coeficientes de competencia y demás. Un procedimiento parecido se aplica en economía cuantitativa y econometría. Los modelos y familias de

ecuaciones aplicadas en esta última se asemejan a los de Lotka o, por decirlo todo, a los de la cinética química, pero el modelo de entidades y fuerzas interactuantes ocupa otro nivel. Por tomar otro ejemplo: los organismos vivos son en el fondo sistemas abiertos, es decir, sistemas que intercambian materia con el medio circundante. La física y la fisicoquímica ordinarias se ocupan de sistemas cerrados, y apenas en años recientes ha sido ampliada la teoría para incluir procesos irreversibles, sistemas abiertos y estados de desequilibrio. Sin embargo, si deseamos aplicar el modelo de los sistemas abiertos —digamos— a los fenómenos del crecimiento animal, automáticamente llegamos a una generalización de la teoría, referente no ya a unidades físicas sino biológicas. En otras palabras, estamos ante sistemas generalizados. Lo mismo pasa en los campos de la cibernética y la teoría de la información, que han merecido tanto interés en los pasados años.

Así, existen modelos, principios y leyes aplicables a sistemas generalizados o a sus subclases, sin importar su particular género, la naturaleza de sus elementos componentes y las relaciones o «fuerzas» que imperen entre ellos. Parece legítimo pedir una teoría no ya de sistemas de clase más o menos especial, sino de principios universales aplicables a los sistemas en general.

De aquí que adelantemos esta nueva disciplina llamada Teoría general de los sistemas. Su tema es la formulación y derivación de aquellos principios que son válidos para los «sistemas» en general.

El sentido de esta disciplina puede ser circunscrito como sigue. La física se ocupa de sistemas de diferentes niveles de generalidad. Se dilata desde sistemas bastante especiales —como los que aplica el ingeniero a la construcción de un puente o una máquina— hasta leyes especiales de disciplinas físicas como la mecánica o la óptica, y hasta leyes de gran generalidad, como los principios de la termodinámica, aplicables a sistemas de naturaleza intrínsecamente diferente —mecánicos, calóricos, químicos o lo que sean. Nada prescribe que tengamos que desembocar en los sistemas tradicionalmente tratados por la física. Podemos muy bien buscar principios aplicables a sistemas en general, sin importar que sean de naturaleza física, biológica o sociológica. Si planteamos esto y definimos bien el sistema, hallaremos que existen modelos, principios y leyes que se aplican a sistemas generalizados, sin importar su particular género, elementos y «fuerzas» participantes.

Consecuencia de la existencia de propiedades generales de sistemas es la aparición de similitudes estructurales o isomorfismos en diferentes campos. Hay correspondencias entre los principios que rigen el comportamiento de entidades que son intrínsecamente muy distintas. Por tomar un ejemplo sencillo, se puede aplicar una ley exponencial de crecimiento a ciertas células bacterianas, a poblaciones de bacterias, de animales o de humanos, y al progreso de la investigación científica medida por el número de publicaciones de genética o de ciencia en general. Las entidades en cuestión, bacterias, animales, gente, libros, etc., son completamente diferentes, y otro tanto ocurre con los mecanismos causales en cuestión. No obstante, la ley matemática es la misma. O tómense los sistemas de ecuaciones que describen la competencia entre especies animales y vegetales en la naturaleza. Se da el caso de que iguales sistemas de ecuaciones se aplican en ciertos campos de la fisicoquímica y de la economía. Esta correspondencia se debe a que las entidades consideradas pueden verse, en ciertos aspectos, como «sistemas», o sea complejos de elementos en interacción. Que los campos mencionados, y otros más, se ocupen de «sistemas», es cosa que acarrea correspondencia entre principios generales y hasta entre leyes especiales, cuando se corresponden las condiciones en los fenómenos considerados.

Conceptos, modelos y leyes parecidos surgen una y otra vez en campos muy diversos, independientemente y fundándose en hechos del todo distintos. En muchas ocasiones fueron descubiertos principios idénticos, porque quienes trabajan en un territorio no se percataban de que la estructura teórica requerida estaba ya muy adelantada en algún otro campo. La teoría general de los sistemas contará mucho en el afán de evitar esa inútil repetición de esfuerzos.

También aparecen isomorfismos de sistemas en problemas recalcitrantes al análisis cuantitativo pero, con todo, de gran interés intrínseco. Hay, p. ej., isomorfismos entre sistemas biológicos y «epiorganismos» (Gerard), como las comunidades animales y las sociedades humanas. ¿Qué principios son comunes a los varios niveles de organización y pueden, así, ser trasladados de un nivel a otro, y cuáles son específicos, de suerte que su traslado conduzca a falacias peligrosas? ¿Pueden las sociedades y civilizaciones ser consideradas como sistemas?

Se diría, entonces, que una teoría general de los sistemas sería un instrumento útil al dar, por una parte, modelos utilizables y trasferibles entre diferentes campos, y evitar, por otra, vagas analogías que a menudo han perjudicado el progreso en dichos campos.

Hay, sin embargo, otro aspecto aun más importante de la teoría general de los sistemas. Puede parafrasearse mediante una feliz formulación debida al bien conocido matemático y fundador de la teoría de la información, Warren Weaver. La física clásica, dijo éste, tuvo gran éxito al desarrollar la teoría de la complejidad no organizada. Por ej., el comportamiento de un gas es el resultado de los movimientos desorganizados, e imposibles de seguir aisladamente, de innumerables moléculas; en conjunto, lo rigen las leyes de la termodinámica. La teoría de la complejidad no organizada se arraiga a fin de cuentas en las leyes del azar y la probabilidad y en la segunda ley de la termodinámica. En contraste, hoy el problema fundamental es el de la complejidad organizada. Conceptos como los de organización, totalidad, directividad, teleología y diferenciación son ajenos a la física habitual. Sin embargo, asoman a cada paso en las ciencias biológicas, del comportamiento y sociales, y son de veras indispensables para vérselas con organismos vivientes o grupos sociales. De esta manera, un problema fundamental planteado a la ciencia moderna es el de una teoría general de la organización. La teoría general de los sistemas es capaz en principio de dar definiciones exactas de semejantes conceptos y, en casos apropiados, de someterlos a análisis cuantitativo.

Hemos indicado brevemente el sentido de la teoría general de los sistemas, y ayudará a evitar malos entendidos señalar ahora lo que no es. Se ha objetado que la teoría de los sistemas no quiere decir nada más que el hecho trivial de que matemáticas de alguna clase son aplicables a diferentes clases de problemas. Por ej., la ley del crecimiento exponencial es aplicable a muy diferentes fenómenos, desde la desintegración radiactiva hasta la extinción de poblaciones humanas con insuficiente reproducción. Así es, sin embargo, porque la fórmula es una de las más sencillas ecuaciones diferenciales y por ello se puede aplicar a cosas muy diferentes. O sea que si se presentan las llamadas leyes isomorfas del crecimiento en muy diversos procesos, no es esto más significativo que el hecho de que la aritmética elemental sea aplicable a todos los objetos contables, que  $2 + 2$  sean  $4$ , sin importar que se trate de manzanas, átomos o galaxias.

La respuesta es la siguiente. No sólo en el ejemplo citado como simple ilustración, sino en el desenvolvimiento de la teoría de los sistemas, la cuestión no es la aplicación de expresiones matemáticas bien conocidas. Antes bien, son planteados problemas

novedosos y que en parte parecen lejos de estar resueltos. Según mencionamos, el método de la ciencia clásica era de lo más apropiado para fenómenos que pueden descomponerse en cadenas causales aisladas o que son consecuencia estadística de un número «infinito» de procesos aleatorios, como pasa con la mecánica estadística, el segundo principio de la termodinámica y todas las leyes que de él emanan. Sin embargo, los modos clásicos de pensamiento fracasan en el caso de la interacción entre un número grande, pero limitado, de elementos o procesos. Aquí surgen los problemas circunscritos por nociones como las de totalidad, organización y demás, que requieren nuevos modos de pensamiento matemático.

Otra objeción hace hincapié en el peligro de que la teoría general de los sistemas desemboque en analogías sin sentido. Este riesgo existe, en efecto. Así, es una idea difundida considerar el Estado o la nación como organismo en un nivel superordinado. Pero semejante teoría constituiría el fundamento de un Estado totalitario, dentro del cual el individuo humano aparece como célula insignificante de un organismo o como obrera intrascendente en una colmena.

La teoría general de los sistemas no persigue analogías vagas y superficiales. Poco valen, ya que junto a las similitudes entre fenómenos siempre se hallan también diferencias. El isomorfismo que discutimos es más que mera analogía. Es consecuencia del hecho de que, en ciertos aspectos, puedan aplicarse abstracciones y modelos conceptuales coincidentes a fenómenos diferentes. Sólo se aplicarán las leyes de sistemas con mira a tales aspectos. Esto no difiere del procedimiento general en la ciencia. Es una situación como la que se puede dar cuando la ley de la gravitación se aplica a la manzana de Newton, el sistema planetario y los fenómenos de las mareas. Quiere decir que de acuerdo con ciertos aspectos limitados, un sistema teórico, el de la mecánica, es válido; no se pretende que haya particular semejanza entre las manzanas, los planetas y los océanos desde otros muchos puntos de vista.

Una objeción más pretende que la teoría de los sistemas carece de valor explicativo. Por ej., algunos aspectos de la intencionalidad orgánica, como lo que se llama equifinalidad de los procesos del desarrollo, son susceptibles de interpretación con la teoría de los sistemas. Sin embargo, hoy por hoy nadie está en condiciones de definir en detalle los procesos que llevan de un cigoto animal a un organismo, con su miríada de células, órganos y funciones muy complicadas.

Consideraremos aquí que hay grados en la explicación científica, y que en campos complejos y teóricamente poco desarrollados tenemos que conformarnos con lo que el economista Hayek llamó con justicia «explicación en principio». Un ejemplo indicará el sentido de esto.

La economía teórica es un sistema altamente adelantado que suministra complicados modelos para los procesos en cuestión. Sin embargo, por regla general los profesores de economía no son millonarios. Dicho de otra manera, saben explicar bien los fenómenos económicos «en principio», pero no llegan a predecir fluctuaciones de la bolsa con respecto a determinadas participaciones o fechas. Con todo, la explicación en principio es mejor que la falta de explicación. Si se consigue insertar los parámetros necesarios, la explicación «en principio» en términos de teoría de los sistemas pasa a ser una teoría análoga en estructura a las de la física.

## **Significado de la teoría general de sistemas. Segunda Parte Ludwig von Bertalanffy**

*En varias disciplinas de la ciencia moderna han ido surgiendo concepciones y puntos de vista generales semejantes.*

### **Metas de la teoría general de los sistemas**

En tanto que antes la ciencia trataba de explicar los fenómenos observables reduciéndolos al juego de unidades elementales investigables independientemente una de otra, en la ciencia contemporánea aparecen actitudes que se ocupan de lo que un tanto vagamente se llama «totalidad», es decir, problemas de organización, fenómenos no descomponibles en acontecimientos locales, interacciones dinámicas manifiestas en la diferencia de conducta de partes aisladas o en una configuración superior, etc.; en una palabra, «sistemas» de varios órdenes, no comprensibles por investigación de sus respectivas partes aisladas.

Tales consideraciones se resumen así:

Concepciones y problemas de tal naturaleza han aparecido en todas las ramas de la ciencia, sin importar que el objeto de estudio sean cosas inanimadas, organismos vivientes o fenómenos sociales. Esta correspondencia es más llamativa en vista de que cada ciencia siguió su curso independiente, casi sin contacto con las demás y basándose todas en hechos diferentes y filosofías contradictorias. Esto indica un cambio general en la actitud y las concepciones científicas.

No sólo se parecen aspectos y puntos de vista generales en diferentes ciencias; con frecuencia hallamos leyes formalmente idénticas o isomorfas en diferentes campos. En muchos casos, leyes isomorfas valen para determinadas clases o subclases de «sistemas», sin importar la naturaleza de las entidades envueltas. Parece que existen leyes generales de sistemas aplicables a cualquier sistema de determinado tipo, sin importar las propiedades particulares del sistema ni de los elementos participantes.

Estas consideraciones conducen a proponer una nueva disciplina científica, que llamamos teoría general de los sistemas. Su tema es la formulación de principios válidos para «sistemas» en general, sea cual fuere la naturaleza de sus elementos componentes y las relaciones o «fuerzas» reinantes entre ellos.

De esta suerte, la teoría general de los sistemas es una ciencia general de la «totalidad», concepto tenido hasta hace poco por vago, nebuloso y semimetafísico. En forma elaborada sería una disciplina lógico-matemática, puramente formal en sí misma pero aplicable a las varias ciencias empíricas. Para las ciencias que se ocupan de «todos organizados», tendría significación análoga a la que disfrutó la teoría de la probabilidad para ciencias que se las ven con «acontecimientos aleatorios»; la probabilidad es también una disciplina matemática formal aplicable a campos de lo más diverso, como la termodinámica, la experimentación biológica y médica, la genética, las estadísticas para seguros de vida, etc.

Esto pone de manifiesto las metas principales de la teoría general de los sistemas:

- (1) Hay una tendencia general hacia la integración en las varias ciencias, naturales y sociales.
- (2) Tal integración parece girar en torno a una teoría general de los sistemas.
- (3) Tal teoría pudiera ser un recurso importante para buscar una teoría exacta en los campos no físicos de la ciencia.

- (4) Al elaborar principios unificadores que corren «verticalmente» por el universo de las ciencias, esta teoría nos acerca a la meta de la unidad de la ciencia.
- (5) Esto puede conducir a una integración, que hace mucha falta, en la instrucción científica.

Es oportuna una observación acerca de la delimitación de la teoría aquí discutida. El nombre y el programa de una teoría general de los sistemas los introdujo quien esto escribe hace ya años. Resultó, sin embargo, que no pocos investigadores de varios campos habían llegado a conclusiones y enfoques similares. Se propone, pues, conservar el nombre, que va imponiéndose en el uso general, aunque fuera sólo como rótulo conveniente.

De buenas a primeras, da la impresión de que la definición de sistemas como «conjuntos de elementos en interacción» fuera tan general y vaga que no hubiera gran cosa que aprender de ella. No es así. Por ej., pueden definirse sistemas merced a ciertas familias de ecuaciones diferenciales, y si, como es costumbre en el razonamiento matemático, se introducen condiciones más específicas, aparecen muchas propiedades importantes de los sistemas en general y de casos más especiales.

El enfoque matemático adoptado en la teoría general de los sistemas no es el único posible ni el más general. Hay otra serie de enfoques modernos afines, tales como la teoría de la información, la cibernética, las teorías de los juegos, la decisión y las redes, los modelos estocásticos, la investigación de operaciones —por sólo mencionar los más importantes—; sin embargo, el hecho de que las ecuaciones diferenciales cubran vastas áreas en las ciencias físicas, biológicas, económicas, y probablemente también las ciencias del comportamiento, las hace vía apropiada de acceso al estudio de los sistemas generalizados.

Pasaré a ilustrar la teoría general de los sistemas con algunos ejemplos.

### **Sistemas cerrados y abiertos: limitaciones de la física ordinaria**

Mi primer ejemplo será el de los sistemas cerrados y abiertos. La física ordinaria sólo se ocupa de sistemas cerrados, de sistemas que se consideran aislados del medio circundante. Así, la fisicoquímica nos habla de las reacciones, de sus velocidades, y de los equilibrios químicos que acaban por establecerse en un recipiente cerrado donde se mezclan cierto número de sustancias reaccionantes. La termodinámica declara expresamente que sus leyes sólo se aplican a sistemas cerrados. En particular, el segundo principio afirma que, en un sistema cerrado, cierta magnitud, la entropía, debe aumentar hasta el máximo, y el proceso acabará por detenerse en un estado de equilibrio. Puede formularse el segundo principio de diferentes modos, según uno de los cuales la entropía es medida de probabilidad, y así un sistema cerrado tiende al estado de distribución más probable. Sin embargo, la distribución más probable de una mezcla —digamos— de cuentas de vidrio rojas y azules, o de moléculas dotadas de velocidades diferentes, es un estado de completo desorden; todas las cuentas rojas por un lado y todas las azules por otro, o bien, en un espacio cerrado, todas las moléculas veloces —o sea de alta temperatura— a la derecha, y todas las lentas —baja temperatura— a la izquierda, son estados de cosas altamente improbables. O sea que la tendencia hacia la máxima entropía o la distribución más probable es la tendencia al máximo desorden.

Sin embargo, encontramos sistemas que, por su misma naturaleza y definición, no son sistemas cerrados. Todo organismo viviente es ante todo un sistema abierto. Se mantiene en continua incorporación y eliminación de materia, constituyendo y demoliendo componentes, sin alcanzar, mientras la vida dure, un estado de equilibrio

químico y termodinámico, sino manteniéndose en un estado llamado uniforme (steady) que difiere de aquél. Tal es la esencia misma de ese fenómeno fundamental de la vida llamado metabolismo, s procesos químicos dentro de las células vivas. ¿Y entonces? Es obvio que las formulaciones habituales de la física no son en principio aplicables al organismo vivo qua sistema abierto y en lo uniforme, y bien podemos sospechar que muchas características de los sistemas vivos que resultan paradójicas vistas según las leyes de la física son consecuencia de este hecho.

No ha sido sino hasta años recientes cuando hemos presenciado ana expansión de la física orientada a la inclusión de sistemas abiertos. Esta teoría ha aclarado muchos fenómenos oscuros en física y biología, y ha conducido asimismo a importantes conclusiones generales, de las cuales sólo mencionaré dos.

La primera es el principio de equifinalidad. En cualquier sistema cerrado, el estado final está inequívocamente determinado por las condiciones iniciales: p. ej., el movimiento en un sistema planetario, donde las posiciones de los planetas en un tiempo  $t$  están inequívocamente determinadas por sus posiciones en un tiempo  $t_0$ . O, en un equilibrio químico, las concentraciones finales de los compuestos reaccionantes depende naturalmente de las concentraciones iniciales. Si se alteran las condiciones iniciales o el proceso, el estado final cambiará también. No ocurre lo mismo en los sistemas abiertos. En ellos puede alcanzarse el mismo estado final partiendo de diferentes condiciones iniciales y por diferentes caminos. Es lo que se llama equifinalidad, y tiene significación para los fenómenos de la regulación biológica. Quienes estén familiarizados con la historia de la biología recordarán que fue precisamente la equifinalidad la que llevó al biólogo alemán Driesch a abrazar el vitalismo, o sea la doctrina de que los fenómenos vitales son inexplicables en términos de la ciencia natural. La argumentación de Driesch se basaba en experimentos acerca de embriones tempranos. El mismo resultado final —un organismo normal de erizo de mar— puede proceder de un cigoto completo, de cada mitad de un cigoto de éstos, o del producto de fusión de dos cigotos. Lo mismo vale para embriones de otras muchas especies; incluyendo el hombre, donde los gemelos idénticos provienen de la escisión de un cigoto. La equifinalidad, de acuerdo con Driesch, contradice las leyes de la física y sólo puede deberse a un factor vitalista animoide que gobierne los procesos previendo la meta: el organismo normal por constituir. Sin embargo, puede demostrarse que los sistemas abiertos, en tanto alcancen un estado uniforme, deben exhibir equifinalidad, con lo cual desaparece la supuesta violación de las leyes físicas.

Otro aparente contraste entre la naturaleza inanimada y la animada es lo que fue descrito a veces como violenta contradicción entre la degradación kelviniana y la evolución darwiniana, entre la ley de la disipación en física y la ley de la evolución en biología. De acuerdo con el segundo principio de la termodinámica, la tendencia general de los acontecimientos en la naturaleza física apunta a estados de máximo desorden y a la igualación de diferencias, con la llamada muerte térmica del universo como perspectiva final, cuando toda la energía quede degradada como calor uniformemente distribuido a baja temperatura, y los procesos del universo se paren. En contraste, el mundo vivo exhibe, en el desarrollo embrionario y en la evolución, una transición hacia un orden superior, heterogeneidad y organización. Pero, sobre la base de la teoría de los sistemas abiertos, la aparente contradicción entre entropía y evolución desaparece. En todos los procesos irreversibles la entropía debe aumentar. Por tanto, el cambio de entropía en sistemas cerrados es siempre positivo; hay continua destrucción de orden. En los sistemas abiertos, sin embargo, no sólo tenemos producción de entropía debida a procesos irreversibles, sino también entrada de entropía que bien puede ser negativa. Tal es el caso en el organismo vivo, que importa complejas moléculas ricas en energía libre. Así, los sistemas vivos,



ISPS Nº 6005  
Prof. para la Educ. Sec. en Biología  
Materia: Ecología y Etología  
Prof. y Lic. Florencia E. Román

manteniéndose en estado uniforme, logran evitar el aumento de entropía y hasta pueden desarrollarse hacia estados de orden y organización crecientes.

## Unidad I - Trabajo Práctico Nº 1 MARCO TEÓRICO - INTRODUCCIÓN

### Aspectos históricos y epistemológicos de la Ecología

de Viana, M.L., R. Cornejo y M. Quintana. En: Pio García, Sergio Menna y Victor Rodríguez (eds). Selección de trabajos, X Jornadas de Epistemología e Historia de la Ciencia. Vol 7: 111-117.

Entre las disciplinas biológicas la ecología es una ciencia heterogénea, plural y abarcadora, lo que se evidencia desde sus orígenes, en las clásicas divisiones (ecología animal, vegetal, limnología, oceanografía, ecología de poblaciones, de comunidades), y en los aspectos relativos a sus aplicaciones (forestación, piscicultura, agronomía, control de plagas, manejo de vida silvestre, conservación), producto de los distintos niveles de organización que forman parte del objeto de estudio de la ecología: organismos, poblaciones y comunidades.

En el nivel de los organismos, la ecología intenta responder preguntas vinculadas con cómo los individuos están afectados y afectan su ambiente biótico y abiótico, es decir estamos hablando de niveles de tolerancia, ciclos vitales, condiciones y recursos que afectan la supervivencia y reproducción. En el nivel de las poblaciones, la ecología estudia la presencia o ausencia de especies particulares, su abundancia o rareza, sus tendencias o fluctuaciones en número a lo largo del tiempo y las interacciones entre los miembros de una población. La ecología de comunidades trata su composición o estructura, las rutas de energía y materiales, conjuntamente con las interacciones entre las distintas especies y la influencia humana en los sistemas naturales.

A pesar de la heterogeneidad y el desarrollo casi independiente de las distintas ramas en ecología, en todas ha estado presente una noción que ha impregnado el pensamiento occidental: "la de un mundo perfectamente diseñado". Esta afirmación destaca un orden providencial en la naturaleza y es retomado a través del sinónimo "balance de la naturaleza o equilibrio natural" que proviene de la metafísica griega, que influyó en el desarrollo de las concepciones ecológicas en el siglo XVIII y comienzos del XIX. Según esta visión del mundo, la naturaleza está en armonía y la lucha por la existencia es benigna y está programada para mantener el equilibrio natural.

Si bien existen antecedentes de importancia desde la antigüedad en la conformación de la disciplina, el origen de la ecología como ciencia se ubica en la época de publicación de "El Origen de las Especies" por Charles Darwin en 1859.

El término "Ecología" fue introducido en 1860 por Ernst Haeckel, un zoólogo alemán admirador de Darwin y defensor de la teoría de la evolución. Haeckel consideraba que era necesario un término para referirse a la lucha por la existencia que Darwin había discutido en su tratado y definió a la ecología *como la investigación de todas las relaciones de los animales con su ambiente orgánico e inorgánico, incluyendo sobre todo las relaciones amistosas y de enemistad con los animales y plantas con los que en tales ambientes entran en contacto directo o indirecto*. Es decir, el estudio de todas las complejas interrelaciones que Darwin consideraba como condiciones de la lucha por la existencia. Sin embargo Haeckel se empeñó en demostrar cómo a pesar de la lucha por la existencia, la naturaleza se caracteriza por un balance de fuerzas opuestas que como resultado producía una selección que era benéfica y restauradora del "sano equilibrio natural"



Recién en la década del 50 se abandonó la concepción de Clements a pesar de que Henry Allen Gleason (1882-1975) ya en 1926 propuso el concepto individualista de las asociaciones vegetales en contraposición a la metáfora organísmica. Argumentaba que no existían comunidades vegetales fijas y definidas ya que era consciente de que los cambios ambientales aún de corta duración, podían ejercer efectos profundos en la abundancia de las especies.

II. A mediados de los años 20, comienza el auge de la ecología matemática, los modelos de crecimiento poblacional y de interacciones. Surgieron los conceptos de "Cadena alimenticia", "Pirámide de números" y "Nicho".

La ecología matemática comenzó con el análisis del crecimiento poblacional dentro de una especie a partir de los estudios de Raymond Pearl sobre los cambios en las poblaciones humanas luego de la I Guerra Mundial y descubrió que el crecimiento de la población humana en el tiempo seguía una curva regular, que denominó logística y comenzó a ser utilizada por los ecólogos que querían estudiar las fluctuaciones poblacionales.

La ecuación logística fue empleada independientemente por el físico Italiano Vito Volterra y el matemático Alfred Lotka, para construir un modelo básico de competencia entre dos especies y de predación también en un sistema de dos especies.

Elton desarrolló el concepto de nicho como referencia al lugar de los animales en la cadena alimenticia. La interpretación de Grinnel del nicho está vinculada con el lugar donde vive el organismo y era indistinguible del concepto de hábitat. En cambio para Gause el nicho indicaba el lugar de una especie en la comunidad y formuló el principio de la exclusión competitiva.

III. En 1950 aparece la noción de Ecosistema (propuesta por Arthur Tansley) como una unidad de estudio que comprende todas las interacciones entre el medio ambiente físico (condiciones y recursos) y el biológico. Se desarrolló experimentalmente la hipótesis de Gause. Competencia y Nicho se constituyen en activos campos de investigación, conjuntamente con los mecanismos de regulación de las poblaciones.

El concepto de nicho fue rigurosamente definido recién en 1957 por Hutchinson como un hipervolumen de  $n$  dimensiones (que comprende las condiciones y recursos) en donde una población puede completar su ciclo vital.

A pesar de la intención de Hutchinson de definir el nicho, existen problemas con la adopción de los diferentes conceptos teóricos que en el momento de ir a la práctica presentan problemas metodológicos y experimentales, es decir obstáculos epistemológicos (sensu Bachelard), como las dificultades que obstaculizan el desarrollo de la disciplina (el obstáculo básico que presenta la experiencia misma o el conocimiento general).

IV. A partir de los años 70 se considera que las regiones más críticas desde el punto de vista ecológico, son las zonas de interpenetración de ecosistemas diferentes, que al reunirse forman un todo llamado biosfera. Esta época se caracterizó por la crisis ambiental, tomándose conciencia del carácter limitado de los recursos naturales y de la problemática ambiental generada por el crecimiento de las poblaciones humanas y la contaminación producto del desarrollo industrial y de la agricultura.

En 1974 se realizó el primer congreso internacional de ecología en La Haya, bajo el Tema "Conceptos unificadores en Ecología", donde se abordaron temas vinculados con el flujo de materiales y energía entre los niveles tróficos, con una crítica profunda a este concepto y temas vinculados con la diversidad, estabilidad y madurez de los sistemas naturales y de los influidos por actividades humanas

V. La etapa final está caracterizada por la inclusión en el concepto mismo de ecología, del papel predominante que la humanidad desempeña en la biosfera, de la responsabilidad que tiene en su evolución y de la necesidad de tomar en consideración ciertos aspectos intangibles



La publicación de "El origen de las especies" por Darwin, constituye un hito en la historia de las ciencias y adquirió para la Biología en general y la Ecología en particular, carácter de teoría integradora. La visión Darwiniana refutó la filosofía tradicional, basada en la búsqueda de la justificación última y explicó los fenómenos de la naturaleza en base a dos ideas principales: - el árbol único de la vida (las diferentes especies que hoy pueblan la tierra, tienen antepasados comunes) y -la selección natural (basada en la supervivencia y reproducción diferencial de los organismos de una población) que es el proceso responsable del árbol único de la vida.

El darwinismo era incompatible con la visión idealista de la metafísica griega que concibe a los objetos materiales del mundo como estructuras formales ideales y sin cambios en su esencia. Según Lewontin, una consecuencia necesaria de la metafísica griega es que las diferencias entre objetos que pertenecen al mismo tipo, poseen una ontología y ontogenia diferente de aquellas diferencias entre los tipos. Las primeras son consideradas ruido o disturbios y por lo tanto confunden nuestros intentos de descubrir la estructura esencial o ideal del universo. El fin de la filosofía y de la ciencia según esta visión, es poder ver a través de las variaciones y distinguir las formas ideales (Simberloff 1980).

Según Mayr (1963, 1998), el dominio de la visión idealista y tipológica en biología, atrasó la comprensión del evento evolutivo más dramático: la especiación. Ya que si las especies responden a tipos, esencias o ideales que eran fijos por definición, no había lugar para la ocurrencia de la evolución y mucho menos aún si ésta resulta en la producción de nuevas especies o tipos. Los especímenes tipo de la taxonomía, son un legado de la metafísica griega.

La revolución de Darwin (1859) consistió en examinar la variación individual que era descartada como ruido en los tipos, esencias o ideales y por lo tanto la variación entre individuos y entre especies ya no era diferente, sino que estaban causalmente conectadas. Esto ocasionó un reemplazo de la metafísica griega por un materialismo que se fue afianzando con los avances en genética realizados por Mendel (la herencia particulada), la distinción de Johanssen entre fenotipo y genotipo con el reconocimiento de que la morfología, la fisiología y el comportamiento, no son una traducción directa de los genes, sino el producto de una interacción compleja e inseparable entre genes y ambiente. Otro hito fue el reconocimiento de la importancia del azar en los procesos naturales, lo que finalizó con la idea de ortogénesis (tendencias impulsadas por fuerzas divinas).

A los efectos de facilitar el análisis histórico, destacamos 5 fases principales, lo que es una gran simplificación y como división es arbitraria aunque puede ayudar en una síntesis de este tipo, especialmente al vincular los momentos históricos con algunas líneas de investigación que predominaron:

I.-A comienzos del siglo, la ecología era entendida como un acercamiento dinámico y experimental para el estudio de la adaptación, sucesión e interacciones. Se desarrollaron métodos cuantitativos en el estudio de poblaciones y comunidades y principios teóricos acerca de los cambios temporales en las comunidades, con las nociones de climax y super-organismo.

A pesar del cambio de marco conceptual iniciado por Darwin, Frederic Clements, autor del primer libro de Ecología: Research Methods in Ecology (1905), desarrolló una teoría basada en dos ideas principales: el concepto de sucesión ecológica de las formaciones vegetales y el abordaje de las comunidades vegetales como un "organismo complejo" que seguía un ciclo de vida y una historia evolutiva, análogo al desarrollo de un organismo.

Esta concepción del "superorganismo" en la que las distintas poblaciones en la naturaleza están integradas en entidades orgánicas bien definidas, se convirtió en el primer modelo ecológico. La base de esta concepción es que las comunidades siguen un ciclo vital y una historia evolutiva análoga a la de un organismo. También utilizó la idea de climax para desarrollar un sistema de clasificación de las unidades de vegetación que dominaron la ecología vegetal durante la primera mitad del siglo XX.



o no cuantificables del ser humano, tales como la percepción que se tiene del entorno y la manera como se concibe la calidad de la vida. Representa la Conciencia del Cambio Global, como problemática ecológica e interdisciplinaria.

El cambio global entendido como un conjunto de componentes interactuantes que alteran la estructura y función de la tierra como sistema incluye tanto los cambios que alteran los fluidos que envuelven el sistema terrestre, atmósfera y océanos (el aumento de  $CO_2$ , CFC, metano, ON, radiación UV y disminución del ozono estratosférico) como los cambios que ocurren en sitios discretos pero dada su magnitud y distribución, constituyen un cambio global, como los cambios en la cobertura y usos de la tierra, fragmentación de ambientes, invasiones biológicas, residuos, desertificación, pérdida de biodiversidad, entre otros.

Queremos destacar la iniciativa para una biosfera sustentable, encarada por la sociedad americana de ecología y los dos últimos congresos internacionales de ecología 1994 - 1998 en Manchester e Italia y de la IUFRO, donde una vez más se destaca el rol de las actividades humanas, la necesidad de reconocer, anticipar y trabajar con el cambio global y al mismo tiempo tratar de minimizar sus consecuencias. Debemos reconocer que somos la primera generación que percibe cómo el sistema tierra está cambiando y al mismo tiempo somos la última generación con la oportunidad de afectar el curso de muchos de esos cambios.

Así como los avances en física moderna sugieren que se debería abandonar la idea de una sustancia o esencia ya que no hay una entidad idéntica a sí misma que persista en el tiempo, sino un conjunto interactuante de sucesos o procesos, de la misma manera la concepción actual en ecología está caracterizada por el estudio de los procesos, las regulaciones externas de los sistemas abiertos, el carácter probabilista de las interacciones y por la inclusión, en el concepto mismo de ecología del papel predominante que la humanidad desempeña en su evolución en el marco del cambio global. La Ética entra en vinculación directa con la ecología a través del análisis y reformulación de los vínculos humanidad - naturaleza.

El problema de la impredecibilidad y complejidad está presente en todos los aspectos del desarrollo actual de la ecología, lo que produce un ir y venir permanentes con relación a escalas y niveles de análisis de los mecanismos y procesos que operan en los distintos niveles objeto de estudio de la ecología. Los problemas ambientales actuales incluidos en el cambio global, pusieron de manifiesto la irrelevancia del antiguo debate entre ecólogos acerca de trabajar en sistemas "prístinos" o influidos por actividades humanas al tiempo que implicó la consideración del mundo en la concepción del pensamiento complejo relacionado con el impacto de las actividades humanas.

Entre los problemas que debe abordar la ecología pueden mencionarse la mitigación de áreas alteradas, la descontaminación, la elasticidad y vulnerabilidad de los sistemas naturales en su respuesta a los cambios o perturbaciones o la sustentabilidad de los sistemas naturales, por mencionar algunos. Ello ha incorporado una cantidad de interrogantes que exigen respuestas, redefiniciones teóricas y prácticas, nuevas metodologías donde la ecología reelabora su rol como ciencia. Sin embargo, resulta insuficiente ya que aún persisten lastres de una concepción de ciencia tradicional que simplifica la realidad, especialmente en estudios vinculados con la teoría clásica de la competencia y las situaciones de equilibrio. Aquí el azar y las perturbaciones son considerados ruido y no un componente fundamental de los sistemas y, además, excluye de su análisis el efecto complejizador de otras interacciones y en particular las actividades humanas, hoy en día inseparables de los sistemas naturales.

Así, la Ecología, conjuntamente con el aporte de otras ciencias como la física, la sociología, la matemática, la biología, la geología, la química, la filosofía entre otras, se ha enriquecido y al mismo tiempo ha ido configurando una identidad creciente en la que se resignifica permanentemente.



### Bibliografía

- Bachelard, G. 1945. *La Formación del Espíritu Científico*. Ed. Siglo XXI.
- Cornejo, R. y M. de Viana. 1997. Reduccionismo y holismo en biología. IX Jornadas de Epistemología e Historia de la Ciencia.
- Deleage, J.P. 1991. *Historia de la Ecología*. Ed. Icaria. Barcelona.
- de Viana, M. 1992. Un Problema Ético - Ecológico: La Degradación. *Puerta Abierta* #5.
- Acreche, N. y M. de Viana. 1993. Darwin y la Ecología. *Claves*, II, 19: 22.
- de Viana, M. y N. Acreche. 1993. Oriente, occidente y la Teoría Ecológica. *Claves*, II, 21: 22.
- de Viana, M.L., Núñez, A. y Acosta R. 1997. *Ecología en el nivel terciario: Qué y como se enseña*. I Jornadas Educativas del NOA
- de Viana, M.L. 1998. *Cambio Global y Problemática Ambiental Local*. Conferencia curso de post-grado de "Derecho Ambiental". Universidad Católica de Salta, Universidad Nacional de Salta, Ilustre Colegio de Abogados de Madrid y Colegio de Abogados de Salta.
- Feyerabend, P.K. 1989. *Límites de la ciencia*. Ed. Paidós, Barcelona.
- Feyerabend, P.K. 1992. *Tratado contra el método*. Ed. Tecnos, Madrid.
- Forbes, S.A. 1887. The lake as a microcosm. *Bull. Illinois State Lab. Nat. Hist.* 1:5-10.
- Grimm, V. & C. Wissel. 1997. Babel, or the ecological stability discussions: an inventory and analysis of terminology and a guide for avoiding confusion. *Oecologia* 109: 323-334.
- Johnson, A.R. 1994. *Ecological theory*. *Bull. Ecol. Soc.* 75: 172-173.
- Kuhn, T.S. 1971. *La estructura de las revoluciones científicas*. Fondo de Cultura Económica, Mexico.
- Kuhn, T.S. 1989. *Qué son las revoluciones científicas y otros ensayos*. Ed. Paidós. Barcelona.
- Lakatos, I. 1983. *La metodología de los programas de investigación científica*. Ed. Alianza. Madrid.
- Lakatos, I. 1987. *Historia de la ciencia y sus reconstrucciones racionales*. Tecnos. Madrid.
- Levins, R. & R. Lewontin. 1980. Dialectics and reductionism in ecology. *Synthese*, 43: 47-78.
- Mari, E. 1990. *Elementos de epistemología comparada*. Ed. Punto Sur. Buenos Aires.
- Mayr, E. 1963. *Animal species and evolution*. Harvard Univ. Press. Cambridge.
- Mayr, E. 1998. *Así es la Biología*. Ed. Debate.
- McIntosh, R. P. 1980. The background and some current problems of theoretical ecology. *Synthese*, 43: 195-256.
- Popper, K. 1998. *Los dos problemas fundamentales de la epistemología*. Ed. tecnos, Madrid.
- Real, L.A. & J.H. Brown. 1991. *Foundations of ecology. Classic papers with commentaries*. The University of Chicago Press. Chicago.
- Simberloff, D. 1980. A succession of paradigms in Ecology: Essentialism to materialism and probabilism. *Synthese*, 43:3-40.

### Actividades

De la lectura responder las siguientes preguntas:

1. ¿Por qué la ecología es abarcadora, plural y heterogénea? Explique.
2. ¿Qué preguntas son relevantes a nivel de organismos, poblaciones y comunidades?
3. Explique qué entiende por balance de la naturaleza.
4. ¿Cómo eran concebidos los organismos según la metafísica griega?
5. ¿Cuál es la importancia de Haeckel y cuáles sus diferencias con relación al pensamiento darwiniano?
6. ¿En base a qué ideas principales Darwin refutó la filosofía tradicional? Explique.
7. Explique brevemente las cinco fases principales en las que puede ser dividida la historia de la Ecología como ciencia.
8. ¿Cuál es la concepción actual de la Ecología como ciencia?
9. Mencione algunos problemas actuales que debería abordar la ecología.