



POBLACIÓN Y MEDIO AMBIENTE: LOS DESAFÍOS DE LA COMPLEJIDAD

*Fernando Tudela**

En la cada vez más abundante literatura sobre población y medio ambiente, es frecuente la referencia a la complejidad de las relaciones entre la dinámica poblacional, los procesos económicos y las condiciones ambientales que les sirven de soporte. Este trabajo pretende explorar algunas de las posibilidades metodológicas que se derivan de las formulaciones contemporáneas del concepto de "complejidad" y que pudieran facilitar un acercamiento sistémico e interdisciplinario al problema.

In the increasing literature on population and environment, there is frequent reference to the complexity of the relationships among population dynamics, economic processes and the environmental conditions that surround them. This paper examines some of the methodological possibilities derived from contemporary formulations of the concept of complexity, which could provide a systemic and interdisciplinary approach to the problem.

La complejidad en el lenguaje común

En la práctica común del lenguaje decimos que una situación es *compleja* cuando nos resulta difícil entenderla, cuando por alguna razón nos suscita perplejidad. Podemos definir como *complejo* un objeto que desde nuestro punto de vista incluye demasiadas partes o elementos relacionados. En este sentido laxo, la *complejidad* aparece casi como sinónimo de *complicación*. Nos sentimos perplejos cuando el resultado de una operación centrada en un objeto no corresponde a nuestras expectativas racionales. Desde luego, esta circunstancia no depende sólo de alguna característica intrínseca

* Director académico de Lead for Environment and Development (LEAD International), México.

del objeto, sino de todo aquello que puede afectar nuestra capacidad para entenderlo o ubicarlo en algún contexto que le confiera sentido. Caracterizamos como *compleja* una situación cuyos mecanismos funcionales internos escapan a nuestra comprensión, tal vez por falta de herramientas conceptuales para aprehenderlos. Nos puede resultar difícil caracterizar las relaciones o interacciones que se establecen entre sus componentes. Su heterogeneidad y variabilidad en el tiempo suelen agravar esta dificultad. El reconocimiento de una complejidad parece depender tanto de algunos rasgos propios del objeto, construido como objeto de conocimiento, como de nuestras capacidades para asimilar esa realidad y desarrollar expectativas al respecto.

Con relación a cualquier proceso de conocimiento, que involucra por necesidad tanto a un objeto como a un sujeto, los conceptos se relativizan. Un poderoso microscopio, que inspire respeto al mejor experto del laboratorio, se presentará como objeto de extrema sencillez para quien lo utilice tan sólo para partir nueces. Colocado debajo de una plancha, el *Tractatus Logico-Philosophicus* de Wittgenstein pierde toda su complejidad. En sentido contrario, un radiólogo entrenado percibirá sin dificultad sutiles anomalías orgánicas en una radiografía en la que el ciudadano común sólo intuye la forma de los huesos. El interior de un reloj, que a los usuarios nos parece de enorme complejidad, podría resultar muy simple para el relojero que lo repara. En el lenguaje común, tanto como en la ciencia, la complejidad nunca puede ser una cualidad intrínseca de un objeto o una propiedad inherente a una situación. Habría que concebirla más bien como una circunstancia que *puede* resultar de nuestros empeños cognitivos e interacciones con una realidad determinada.

El descubrimiento de la complejidad en la ciencia

El desarrollo de la ciencia moderna ha conferido al concepto de complejidad un sentido más específico, que empezó a perfilarse a fines del siglo pasado y ha adquirido una extraordinaria popularidad en las dos últimas décadas. En la actualidad, la noción de complejidad constituye uno de los núcleos fundamentales del pensamiento cien-

tífico. Sin embargo, no existe consenso en torno a una definición precisa de la complejidad en este contexto. Peor aún, no parece que el espectro de nociones relacionadas con la complejidad —no linealidad, caos, etc.— converja hacia una interpretación única. No obstante lo anterior, en forma provisional se podría identificar la complejidad como una característica de una realidad sistémica que cumpla los requisitos siguientes:¹

a) *Red de relaciones internas: dinámica de integración / diferenciación.* Cada elemento del sistema establece relaciones con los demás y con la totalidad a la que pertenece. Estas relaciones son las que lo determinan, de tal forma que resulta imposible acotar o definir uno de los elementos sin hacer referencia tanto a los demás como a la totalidad. La interdependencia entre las definiciones aparece así como una característica fundamental de la complejidad.

b) *Red de relaciones externas.* El sistema en su conjunto sólo es un constructo obtenido por medio de un proceso cognitivo, es decir, de abstracción. Lo que permanece fuera del recorte operado puede ser o bien irrelevante a efectos del problema que orienta la construcción del sistema, o bien sustituible por un conjunto preciso de relaciones concretas cuyo efecto integrado reproduce en lo fundamental las interacciones con el mundo exterior al sistema construido. Este conjunto de relaciones que el sistema establece con el exterior, y que determina el campo de las posibilidades en cuanto se refiere a la estructura interna del sistema, es lo que se denomina “condiciones de contorno”. En este contexto, lo “exterior” no se refiere sólo a lo que se ubica fuera del espacio físico producto del recorte espacial operado, sino también y sobre todo a lo que permanece al margen del recorte conceptual orientado por la problemática que se analiza.

c) *No linealidad de las relaciones.* La conducta emergente de un sistema complejo deriva de la naturaleza no lineal de las relaciones internas o externas. Esta no linealidad permite que pequeñas transformaciones puedan desencadenar efectos desestructurantes a nivel del sistema en su conjunto. La impredecibilidad de los estados es-

¹ Retomamos aquí las ideas que aparecen expuestas y desarrolladas en el texto ya clásico sobre los sistemas complejos: Rolando García. “Conceptos básicos para el estudio de sistemas complejos”, en E. Leff (coord.). *Los problemas del conocimiento y la perspectiva ambiental del desarrollo*. México: Siglo XXI, 1986.

tables futuros deriva también de la no linealidad de las relaciones en juego. No es concebible un sistema complejo que pudiera modelizarse mediante un conjunto de relaciones lineales.

El principio de *autorganización* se basa en el reconocimiento de los hechos siguientes:

1) Las condiciones de contorno, los elementos internos y la estructura del sistema no permanecen invariantes. Siempre se producen cambios que pueden deberse a una acción externa o bien a fluctuaciones espontáneas.

2) Los cambios pueden rebasar aquellos umbrales cuya transgresión compromete la estabilidad del sistema. En estas circunstancias el sistema sufre transformaciones hasta que se establece una configuración que resulte compatible con las nuevas situaciones.

La *heterogeneidad* de los elementos de un sistema, es decir, su pertenencia a dominios empíricos diferentes, no constituye una característica que le confiera necesariamente complejidad. Tampoco la *complicación*, o la coexistencia de una multiplicidad de elementos y relaciones, es ingrediente necesario para que un sistema se pueda caracterizar como complejo.

Los sistemas complejos no están dados, como partes de la realidad en espera de que algún observador perspicaz los descubra. Se trata de constructos humanos, sin existencia como entes independientes. Un sistema complejo es una invención, un modelo concreto en el que se incluyen elementos que establecen entre sí y con la totalidad de relaciones no lineales, cuya construcción y análisis ayuda a comprender los mecanismos funcionales de una situación específica. La posibilidad misma de un trabajo interdisciplinario se basa en esta construcción y en este análisis.

Desde sus estadios iniciales, la ciencia ha alcanzado éxitos notables en el proceso de simplificación de modelos conceptuales, hasta reducirlos al conjunto mínimo de relaciones significativas que pudieran explicar una situación dada. Lejos de constituir un defecto, en esta habilidad para reducir problemas a su mínima expresión conceptual ha radicado el poder del pensamiento científico. Lo que constituía una maraña de mitos, creencias, percepciones diversas, pseudo-explicaciones, puede transformarse en un conjunto claro e inteligible de relaciones. A principios del siglo pasado, la ciencia aspiraba a acercarse al ideal de Laplace: la reconstrucción precisa

del pasado y del futuro a partir de un conocimiento exhaustivo de estados iniciales y de reglas o leyes deterministas. Se consideraba que determinismo y predictibilidad eran prácticamente sinónimos. Los modelos lineales constituían formas ideales de representar la conducta de la realidad.

Hacia fines del siglo pasado, a pesar de la reacción defensiva surgida de las ciencias sociales emergentes, se consideraba que los principios y los métodos de la mecánica newtoniana, la más exitosa de las disciplinas científicas, constituía la única medida paradigmática para juzgar acerca de la validez de cualquier desarrollo con pretensiones científicas. Cualquier pensamiento que no se vinculara en forma explícita con dichos principios se hacía acreedor a una expulsión del dominio de la ciencia. Sin embargo, aparecieron un conjunto creciente de problemas frente a los cuales se estrellaban los procedimientos ortodoxos. Rebasar un cierto umbral en el proceso de simplificación de los modelos implicaba deshacer el objeto de estudio en construcción y renunciar a la posibilidad de comprender el problema en cuestión. Los científicos empezaron a referirse a dichos problemas como *complejos*.

La controvertida separación entre las ciencias *sociales* y las *naturales* no resultó demasiado significativa para el descubrimiento científico de la complejidad. De hecho, las contribuciones iniciales más notables para el reconocimiento científico de la idea de complejidad provinieron del campo de las ciencias más *duras*. En un mundo agitado por crecientes incertidumbres, parecían existir algunos asideros cuya firmeza resultaba reconfortante: las regularidades astronómicas, por ejemplo. Se pueden predecir los movimientos de los cuerpos celestes más cercanos con una precisión que excede la capacidad de observación. El sistema solar parecía el más estable, determinista y predecible de cuantos sistemas pudiéramos concebir. Conocemos con exactitud el año, día, hora y minutos en que el próximo eclipse solar podrá observarse en un punto concreto de la superficie del planeta. Tomamos con fundado escepticismo la predicción del tiempo para la semana próxima, pero no nos cabe duda de que el cometa Halley volverá a visitarnos en el año 2061. El nivel de confianza del dato es tal que, como sucede con las tablas de mareas que difunden las autoridades de los puertos marítimos, ni siquiera se percibe como predicción, sino como una deducción nece-

saria. Newton,² Lagrange,³ Laplace,⁴ Hamilton,⁵ LeVerrier⁶ son los héroes científicos cuyos trabajos nos permiten asumir este tipo de asombrosas certidumbres. Como manifestaba Albert Einstein en su polémica con los promotores de la mecánica cuántica, tal parece que no hay lugar para el juego de dados en este Universo.

Es una verdadera lástima que la conducta de los cuerpos celestes resulte mucho menos confiable cuando se examina la escala de tiempo adecuada. Cuando analizaba el movimiento orbital de Marte, Kepler no podía sino ignorar los efectos de las interacciones gravitatorias entre dicho planeta y los demás. Desde este enfoque, absolutamente necesario para abordar el problema en primera aproximación y con las técnicas de la época, se consideraba que cada planeta interactuaba sólo con el Sol. En parte por consideraciones ideológicas, a fines del siglo pasado bastantes científicos se preocuparon por estudiar la estabilidad del sistema solar. Este problema sólo se puede abordar tomando en consideración las interacciones gravitatorias entre todos los principales cuerpos que integran el sistema. Aquí los científicos se toparon con sorpresas. Hace ya un siglo Henri Poincaré⁷ se abocó a resolver una versión simplificada de este problema e intentó averiguar qué le sucede a un cuerpo pequeño al incorporarse a un sistema compuesto por otros dos de mucho mayor tamaño —el denominado *problema de los tres cuerpos*. Sin salir del marco teórico proporcionado por la mecánica clásica newtoniana, Poincaré sentó así las bases teóricas para asumir como inevitable algún grado de incertidumbre cuando se amplía lo suficiente la escala de tiempo. Cálculos contemporáneos⁸ han confirmado la posi-

² I. Newton. *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, Londres: Royal Society, 1687.

³ J.L. Lagrange. Memoria enviada a la Academia de Ciencias de París sobre el sistema de Júpiter. 1766. *Mécanique Analytique*, París, 1788.

Véase *Oeuvres de Lagrange*, París: Serret et Darboux, 14 vols. 1867-92.

⁴ P.S. Laplace. *Théorie de Jupiter et de Saturne, Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de Paris; Mémoire sur les inégalités séculaires des planètes. Oeuvres Complètes*, tomo XI, 1785-1788.

⁵ W.R. Hamilton. *On a General Method in Dynamics*, 2 Memoirs, Dublín, 1834-35.

⁶ U.J. LeVerrier. *Annales de l'Observatoire de Paris*, tomo II, París: Mallet Bachelet, 1856.

⁷ H. Poincaré. *Les Méthodes Nouvelles de la Mécanique Céleste*, París, Flammarion, 1892-1899. Reimpresión: A. Blanchard, París, 1987.

⁸ Véase J. Laskar "La stabilité du système solaire", en A. Dahan Dalmedico, J.-L. Chabert, K. Chemla (eds.). *Chaos et Déterminisme*, París: Editions du Seuil, 1992.

bilidad de una conducta caótica del modelo que describe los movimientos de los planetas menores, entre los que se incluye la Tierra, a una escala de tiempo del orden de los cien millones de años. Desde una perspectiva antropocéntrica, cien millones de años equivalen a la eternidad. Si pensamos en una edad probable del planeta Tierra de unos 4 mil 500 millones de años, esa eternidad cabe unas cuarenta y cinco veces. Nótese que hablamos del modelo clásico, newtoniano, del sistema solar, no del sistema solar mismo, que no sabemos si resulte más caprichoso o, al contrario, más regular y mejor portado que el modelo. Resulta fundamental, de cualquier forma, no confundir el modelo con la realidad, sobre todo porque la única forma que tenemos de ir aproximándonos a ésta consiste en utilizar en forma progresiva modelos cada vez más depurados.

La aparición de rangos de conducta caótica en el modelo deriva de su naturaleza no lineal. Coexiste aquí el más estricto determinismo con la imposibilidad de emitir una predicción válida en los rangos y límites de tiempo en que se presenta el dominio caótico. Determinismo y predictibilidad dejaron ya de ser sinónimos. El tema de la estabilidad del sistema solar, que tanto preocupaba a los medios científicos finiseculares y que dio origen a la convocatoria, por parte del rey de Suecia, de un premio que con toda justicia recayó en el propio Poincaré, no admite una solución en términos absolutos. El problema carece de sentido si no se especifica la escala temporal a la que se quiere plantear.

Bajemos ahora de una escala espacial cósmica a la más modesta consideración de lo que sucede en una población de peces que coloniza un pequeño estanque. Se supone que esta población se verá afectada por un solo factor limitante, que podría estar constituido por una disponibilidad fija de alimento. Para enfrentar este tipo de problemas Raymond Pearl sugirió en 1920 la utilización de la ecuación logística, concebida como la expresión matemática más simple de lo que pudiera ser una ley general en el marco de la teoría ecológica de poblaciones.⁹ Esta expresión asume la forma de una ecuación diferencial:

$$dP / dt = r.P (K-P) / K,$$

⁹ Véase R.P. McIntosh. *The Background of Ecology*, Cambridge: Cambridge Studies in Ecology, Cambridge University Press, 1985.

en la que P indica la población o número de individuos, peces en este caso, r es una constante que expresa la tasa máxima de incremento poblacional en un ambiente carente de limitaciones, y K representa la capacidad de carga, o población máxima que podría sobrevivir en el entorno concreto y en las condiciones fijadas. En términos gráficos, la representación de la ecuación logística adopta la forma de una curva sigmoide, en forma de S. La utilidad de la función logística y de sus múltiples derivaciones o variantes ha sido tema de acaloradas discusiones entre demógrafos y ecólogos, que no sería apropiado reseñar aquí. Asumamos que la dinámica de una población dada se ve reflejada con toda exactitud por un modelo absolutamente determinista, en el que los individuos se reproducen en forma discreta, y que pudiera representarse por la ecuación logística simplificada:

$$P_{n+1} = r \cdot P_n (1 - P_n).$$

En ella n constituye un número entero positivo que representa el tiempo, y P es la población expresada como fracción de la capacidad de carga total, asumida como unidad ($0 < P < 1$). Al proceder por iteración para hallar la población final de equilibrio, se esperaría encontrar una serie convergente que conduzca a una solución estable. Ésta sería una conducta decente del modelo. Por desgracia, ni los modelos manifiestan ya conductas decentes, y bajo circunstancias específicas aparecen comportamientos erráticos e inesperados. En vez de descartar este comportamiento como simple aberración formal, el matemático J. Yorke¹⁰ exploró en forma sistemática la correspondencia, en el espacio fase, entre las poblaciones que se obtienen por iteración mediante la ecuación antes reseñada y los valores del parámetro r . Se puso así de manifiesto que para algunos intervalos de r no existía ninguna solución estable. Dentro de un campo acotado de posibilidades, cualquier cosa era posible. Aparece un dominio caótico en el marco de una relación, regida por un determinismo absoluto, y expresada por un modelo formal que destaca por su notable simplicidad.

¹⁰ El amplio público que adquiere *best-sellers* tomó conocimiento del trabajo de Yorke a través del texto de J. Gleick, *Chaos. Making a New Science*, Nueva York: Penguin Books, 1987.

Desde que los investigadores asumieron la tarea de buscarlo, el caos, forma particular de la complejidad, aparece por todas partes. Dejó de ser una curiosa excepción en un mundo regido por la regularidad. Aparece en los más diversos dominios y escalas. En un *switch* gestáltico operado en las últimas décadas, las relaciones modelizables mediante ecuaciones lineales son ahora las que se consideran excepcionales. Más allá de las teorías del caos, el descubrimiento de la complejidad constituye el avance más destacado en la evolución del pensamiento científico de la segunda mitad del siglo XX. Como consecuencia de este interés por los fenómenos complejos se han enfatizado las *discontinuidades*, las transformaciones cualitativas, los cambios abruptos que ponen fin a una estabilidad estructural previa. Los cambios paradigmáticos, aquellos que T. Khun¹¹ denominaba *revoluciones científicas*, se han hecho patentes en múltiples dominios. El conocimiento acumulativo, la *ciencia normal* de Khun, dejó de representar la forma primordial del progreso científico. En este largo y tortuoso camino que conduce hacia las formulaciones modernas del concepto de complejidad, han desempeñado un papel protagónico los sistemas no lineales, la termodinámica de sistemas abiertos, y en particular los trabajos de Ilya Prigogine sobre las *estructuras disipativas*,¹² que le hicieron acreedor al Premio Nobel en 1977. Un nuevo enfoque científico y una nueva forma de abordar el fenómeno de la complejidad se están abriendo camino. Este nuevo desarrollo atraviesa muchas fronteras disciplinarias y parece validarse tanto en los dominios de las ciencias sociales como de las naturales, sin recurrir a los reduccionismos que echaron a perder los esfuerzos neopositivistas de unificación de las ciencias.

En las antiguas cosmogonías, el caos era el desorden absoluto que existía antes de la creación de un mundo ordenado, de un *cosmos*. La idea de complejidad y de caos que emerge de la ciencia moderna representa un desafío para aquella tajante distinción entre el

¹¹ T.S. Kuhn. *The Structure of Scientific Revolutions*, Chicago: University of Chicago Press, 1969. Traducción castellana: Fondo de Cultura Económica. Una reformulación del concepto de paradigma, a cargo del mismo Kuhn, podrá encontrarse en F. Suppe (ed.). *The Structure of Scientific Theories*, Urbana: University of Illinois Press, 1974.

¹² Véase I. Prigogine e I. Stengers. *Order out of Chaos. Man's new dialogue with nature*, Londres: Harper Collins, 1984.

orden y el desorden. No sólo se relativizan dichas nociones, sino que en un sentido genético se dan origen mutuamente. Esta revolución inquieta, pero también tranquiliza: no cualquier cosa puede suceder en cualquier momento. El mundo resulta inteligible. El desorden que en él existe nunca es absoluto. Se restringe a algunos ámbitos delimitados, obedece a reglas específicas. Ningún *efecto mariposa* puede hacer que nieve en las tierras bajas del trópico.

Población y medio ambiente como fenómenos complejos

Muchas de las situaciones que se presentan en el ámbito de las relaciones entre población, desarrollo y medio ambiente nos suelen parecer complejas, incluso en el sentido restringido al que se hacía alusión anteriormente. Nos habíamos acostumbrado a esperar una proporcionalidad razonable entre la intensidad de una *acción* —una *causa*— que modifica un estado de cosas y los cambios determinados por dicha acción. En un sistema bien portado, pequeñas acciones deben inducir efectos pequeños, o al menos efectos cuya tendencia general quede por completo dentro de nuestra capacidad de predicción. Nos enfrentamos sin embargo a una epidemia de malas conductas sistémicas, en virtud de la cual acciones o perturbaciones en apariencia ínfimas pueden desencadenar procesos de dimensiones significativas, o incluso cataclísmicas, así como las pequeñas interacciones gravitatorias entre los planetas pueden en el largo plazo alterar las órbitas keplerianas de algunos de ellos. Vale la pena mencionar ejemplos de situaciones de esta índole, que se pueden presentar en el ámbito de las relaciones entre los procesos poblacionales y los ambientales.

El encontronazo de los dos mundos

No cabe duda de que 1492 marcó una profunda discontinuidad en los tiempos históricos, incluso en lo que respecta a los problemas de la relación entre el poblamiento y el medio ambiente. Mientras las consecuencias e implicaciones culturales, políticas y económicas de los viajes colombinos y de las sucesivas expediciones que desembarcaron en la conquista americana han acaparado la atención de los

estudiosos y del público en general, el impacto sociobiológico de estos hechos ha tendido a ignorarse, o por lo menos a subestimarse hasta fechas bastante recientes. Este desinterés no podría deberse a la intrascendencia de dicho impacto. Sabemos hoy que la transferencia de unas pocas toneladas de biomasa entre el sur de la Península Ibérica y el continente americano desencadenó hace 500 años procesos biológicos que dieron origen a una descomunal transformación de la biósfera. Este proceso, cuya escala no tiene antecedentes en tiempos históricos, se ha podido describir como “una de las grandes rupturas en la historia del planeta”.¹³

El llamado Encuentro de los Mundos conllevó cambios profundos en la distribución planetaria de las formas de vida. Muy posiblemente, implicó también el mayor colapso conocido de poblaciones humanas. Lo que Emmanuel LeRoy-Ladurie llamó “la unificación del mundo por los microbios” cambió por completo la estructura demográfica de nuestro planeta. No quisiéramos entrar aquí en una polémica que todavía enciende muchos ánimos, y en un terreno en el que el manejo de las cifras resulta especulativo en extremo. Es útil consignar, sin embargo, que según algunas estimaciones fundadas, la población nativa de América podría representar, a fines del siglo XV, cerca del 20 por ciento de toda la humanidad. Como consecuencia sobre todo de la aparición de las más mortíferas epidemias de sarampión y viruela que haya registrado la memoria humana, la población americana pudo haber descendido en el siglo XVII hasta proporciones inferiores al 2 por ciento de la población mundial. Sólo una guerra nuclear podría conducir en la actualidad a resultados semejantes.

¿Por qué resultaron los nativos americanos tan vulnerables frente a enfermedades típicamente infantiles que en el continente euroasiático no representaban riesgo de exterminio masivo? ¿Por qué no sucedió exactamente al revés? ¿Por qué los conquistadores no cayeron víctimas de virulentas enfermedades americanas, para ellos desconocidas, que contribuyeran a diezmar la población del

¹³ A. W. Crosby. “Reassessing 1492”, en *American Quarterly*, vol. 41, diciembre de 1989. Una exposición detallada de las sugestivas hipótesis e ideas de Crosby podrá hallarse en A. W. Crosby. *Ecological Imperialism. The Biological Expansion of Europe, 900-1900*, Cambridge: Cambridge University Press, 1986.

Viejo Mundo, a la manera de lo que se narraba en *La guerra de los mundos*, de H. G. Wells? ¿Por qué, en esta inconsciente y casi ignorada guerra bacteriológica de gran escala, estaba la munición tan mal repartida?¹⁴

El secuestro del hule natural

Las economías de plantación constituyen el paradigma de la especialización antrópica de los ecosistemas propios de los frágiles ambientes tropicales. Si bien fue dominante en el último periodo colonial y en el comienzo de la vida independiente de los países americanos, el modelo de las plantaciones no fue desde luego el único. El primer proceso de desarrollo que tuvo lugar en la Amazonia brasileña se centró en la explotación del hule natural en régimen de recolección en un entorno casi no intervenido. Esta actividad manifestó una expansión considerable en la década de los años cincuenta del siglo pasado, cuando cerca de 25 mil *seringueiros* recolectaban látex de un árbol que se presentaba en formaciones dispersas en la jungla amazónica. A comienzos del siglo XX, el hule natural derivado del látex representaba casi 40 por ciento del total de las exportaciones brasileñas. Esta explotación alcanzó su máxima expresión alrededor de 1910, para después sufrir un marcado colapso en las dos décadas subsiguientes. Las consecuencias sociales de dicho colapso fueron catastróficas. En los años treinta se desarrolló un enorme esfuerzo para recolectar la máxima cantidad posible de hule natural, en función de las necesidades urgentes que imponía a Estados Unidos su participación en la segunda guerra mundial. Se movilizaron en la Amazonia cerca de 100 mil *soldados del hule*, con costos sociales tan significativos como los del colapso anterior. Los resultados fueron de cualquier forma desalentadores. A pesar de la intensidad del esfuerzo desarrollado, la cuenca amazónica brasileña nunca ha podido producir más de 40 mil toneladas de hule natural por año. Las exportaciones de hule natural brasileño de recolección se nulificaron después por completo. La paradoja más cruel tuvo lugar en 1951, cuando el primer cargamento de hule natural, extraído de *Hevea*

¹⁴ En el bando nativo, el tripanosoma de la sífilis fue uno de los pocos organismos patógenos que hicieron el viaje en sentido contrario.

brasiliensis procedente de las plantaciones del sureste asiático, tocó puerto en Brasil.

¿Por qué el auge del hule natural brasileño experimentó un fin tan abrupto justo cuando la producción industrial masiva de automóviles inflaba en forma extraordinaria la demanda de hule para llantas? ¿Por qué fueron tan decepcionantes los esfuerzos brasileños de recolección de hule? ¿Por qué los intentos desesperados por establecer plantaciones de hule en la cuenca amazónica, como aquel que protagonizó con amplio despliegue de recursos financieros y tecnológicos la Ford Motor Co. redundaron en estrepitosos fracasos? La mayor parte de los elementos que permitirían dar respuesta a estas cuestiones y despejar nuestra perplejidad se encuentra en el ya clásico texto de Warren Dean,¹⁵ en el que se ponen de manifiesto las complejas relaciones ecológicas y sociales que permiten entender las condiciones de la producción y recolección del hule natural amazónico.

El derrumbe del plátano tabasqueño

El estado de Tabasco, ubicado en el extremo meridional de la costa del Golfo de México, produjo en 1935 cerca de 180 mil toneladas de plátano, que representaban casi el 40 por ciento del total de la producción nacional. En aquella fecha, el estado mexicano de Tabasco era el primer exportador internacional del fruto, seguido de cerca por Honduras. Las plantaciones de plátano ocupaban entonces en Tabasco no más del 15 por ciento de la superficie cultivada. Constituían, sin embargo, el eje de la actividad económica, y el principal elemento estructurador de las relaciones políticas y sociales. En 1941, la producción tabasqueña de plátano cayó a menos de mil quinientas toneladas. Este desplome, que representó la virtual desaparición del 99 por ciento de la capacidad productiva platanera regional, determinó serias consecuencias en el plano social y político. El colapso del denominado oro verde originó migraciones que acentuaron la dispersión rural de la población y alteraron los patrones existentes de uso y ocupación del suelo. A casi 20 años de que se aplacaran los últimos episodios de la Revolución mexicana se dio impulso

¹⁵ W. Dean. *Brazil and the Struggle for Rubber. A Study in Environmental History*, Cambridge: Cambridge University Press, 1987.

en Tabasco a una reforma agraria de gran escala. La crisis bananera representó el más claro parteaguas de la historia de la región.

Se suele responsabilizar a las plagas por este desastre, pero la explicación resiste cualquier formulación simplista. A mediados de la década de los años treinta, diversas epidemias de plagas fungales asolaron las plantaciones de plátano del Caribe y de Centroamérica, causando daños de importancia, pero sin llegar a devastaciones equivalentes a las que sufrieron sus contrapartes tabasqueñas. Incluso en México, las plagas afectaron a las plantaciones de Veracruz, sin que por ello sufrieran una destrucción masiva. ¿De qué depende que un caso específico cause daños de consideración en un contexto, pero determine verdaderas catástrofes aniquiladoras en otro? Publicamos en otra parte¹⁶ una explicación detallada de este hecho, en la que se tomaba en consideración un conjunto complejo de factores, entre los que destacan las condiciones ecológicas de las tierras bajas de Tabasco, el deterioro de las plantaciones locales por efecto de una escasez de inversiones, descuido e inadecuación tecnológica. Estos factores exigen sin embargo explicaciones adicionales. Indagar acerca de *la causa* del desastre tabasqueño carecería de sentido e implicaría formular una pregunta equivocada. Para ser eficaz, cualquier análisis necesita tomar en consideración un conjunto de *relaciones* entre elementos biofísicos y sociales que sufre modificaciones históricas. Su historia no puede reducirse a una reseña paralela de los cambios biofísicos y de las transformaciones socioeconómicas.

Sequías y hambrunas en África saheliana y subsaheliana

Al comienzo de la década de los años setenta, sobre todo en 1972-1973, la región subsaheliana de África padeció una sequía severa, que redujo su capacidad para la producción de alimentos. La tragedia resultante cobró la forma de una catastrófica hambruna, de las más mortíferas registradas, que atrajo la atención de científicos sociales y ambientales de todo el mundo. La explicación convencional del fenómeno señalaba a la sequía como la principal causa del sufrimiento humano y un sinnúmero de instituciones empezó a preocu-

¹⁶ F. Tudela (coord.). *La modernización forzada del trópico: el caso de Tabasco*, Mexico: El Colegio de México, 1989.

parse por la *seguridad alimentaria*. Algunas preguntas embarazosas permanecían sin embargo sin respuesta. ¿Por qué fluctuaciones climáticas de una intensidad similar a la de la sequía de 1972-1973 no habían conllevado consecuencias tan dramáticas? ¿Cómo puede ser que países que estaban padeciendo la hambruna exportaran alimentos a la vez que recibían ayuda internacional? La Federación Internacional de Institutos de Estudios Avanzados (IFIAS) y el Instituto Aspen establecieron un proyecto internacional para esclarecer mejor el problema. El equipo, encabezado por el doctor Rolando García, investigó a fondo las implicaciones sociales, políticas y ambientales de la catástrofe. El reporte final, significativamente titulado *La Naturaleza se declara no culpable*,¹⁷ constituye un clásico en la literatura sobre sistemas complejos, y demostró la productividad de este enfoque para dilucidar cuestiones relacionadas con el medio ambiente y el desarrollo.

Aspectos metodológicos del enfoque de sistemas complejos

Para entender en su complejidad real las situaciones a las que acabamos de aludir, se necesitan construir sistemas analíticos que reflejen dicha complejidad. En la práctica, no resulta nada fácil. Pero plantear los problemas relativos a la población, el desarrollo y el medio ambiente en términos de sistemas complejos ayuda a formular nuevas preguntas, con mayor productividad analítica. Nos limitaremos aquí a señalar algunos de los principales problemas metodológicos que cabe esperar surjan en diversos momentos de una investigación orientada por el enfoque de los sistemas complejos.¹⁸

Delimitación del sistema; condiciones de contorno

Construir un objeto de estudio implica *recortar la realidad*, proceder por abstracciones sucesivas. Reducido a su acepción más ingenua, el concepto de *totalidad*, incorporado a un análisis que trate de ser lo

¹⁷ Rolando V. García *et al.* *Nature Pleads Not Guilty*, vol. I de *Drought and Man, The 1972 Case History Series*, Oxford: Pergamon Press, 1981.

¹⁸ Expresamos aquí un agradecimiento especial al doctor Rolando García y a los demás participantes en el seminario desarrollado en la Sección de Metodología y Teoría de la Ciencia del Centro de Investigación y Estudios Avanzados, CINVESTAV, por la magnífica oportunidad de discutir en dicho marco estas cuestiones metodológicas.

más *completo* que sea posible, resulta estéril e impráctico. El recorte definitorio del objeto de estudio no es en realidad un punto de partida, sino de llegada. Es producto de una serie de aproximaciones sucesivas, por vías de prueba y error. Si se supiera exactamente lo que resulta pertinente y lo que no en el marco de una explicación sistémica, es decir, lo que debe incluirse como elemento interno, lo que puede configurar un conjunto apropiado de condiciones de contorno, y lo que resulta irrelevante a efectos de la indagación, este conocimiento nuestro haría innecesaria la investigación misma. La delimitación reconstructiva del objeto de estudio implica por lo general el progresivo descubrimiento de criterios espaciales, temporales y conceptuales que contribuyen a definirlo en relación con totalidades más amplias. Casi nunca resulta obvia la necesidad de incluir o de excluir en el sistema elementos específicos. El efecto global de todo aquello que debe quedar fuera de nuestro recorte debe ser equivalente al conjunto de las condiciones de contorno. Sus cambios se conciben como perturbaciones capaces de desencadenar aquellas transformaciones estructurales que configuran la explicación que buscamos.

Por lo general nuestra cultura nos orienta hacia la elaboración de enciclopedias embrionarias, y mediante un prodigioso acto de fe, tendemos a encomendar al lector el esfuerzo final de integración y síntesis en la búsqueda de la pertinencia. En el caso del sistema que explicaría la dinámica de la economía del hule natural en Brasil, la demanda internacional y los precios del mercado mundial formarían parte desde luego de sus condiciones de contorno. Como resultado de la extraordinaria productividad de las plantaciones del Sureste Asiático, el precio internacional del hule natural sufrió una abrupta caída, a partir de 1910, a niveles equivalentes a la cuarta parte de los valores de partida, a pesar de una demanda creciente, impulsada por la introducción masiva de vehículos automotores. En el caso brasileño, este cambio operado en una variable fundamental de las condiciones de contorno determinó la desestabilización del sistema en su conjunto. En el caso de las plantaciones bananeras tabasqueñas, fue la introducción de dos severísimas plagas fungales, el "Mal de Panamá" (*Fusarium oxysporum*), y sobre todo el "Sigatoka" (*Mycosphaerella musicola*), lo que actuó como una perturbación que el sistema no pudo neutralizar. En 1938, un año después de la in-

roducción del *Sigatoka* en territorio mexicano, el 90 por ciento de las plantaciones tabasqueñas aparecían ya infectadas.

Un auge o una caída en la demanda de un producto o mercancía, un cambio drástico en su precio de mercado, la introducción de un agente biológico capaz de alterar el equilibrio ecológico anterior, la llegada de fuertes inversiones, constituyen formas usuales de perturbación mediante cambios en las condiciones de contorno de un sistema, que pueden o no inducir transformaciones estructurales en el mismo, en función de sus umbrales de estabilidad y resiliencia. Estos cambios en las condiciones de contorno derivan de procesos de otro nivel, cuyo análisis exigiría la construcción de un modelo diferente, por lo general a una escala más amplia.

Identificación de escalas y niveles de análisis

Tal vez el cambio más significativo en la percepción científica de los problemas ambientales consiste en trascender los enfoques que se limitan a describir *estados* y desarrollar esfuerzos basados en la reconstrucción de *procesos*. Las transformaciones a las que hemos venido aludiendo son resultado de la interacción de procesos que se desarrollan a niveles diferentes. La acumulación de resistencias epidemiológicas en la población del Viejo Mundo, desde la Edad Media hasta el siglo XV, la constitución y la transformación de un mercado mundial para el hule natural, la disrupción operada en el orden social institucional en los países africanos del Sahel, son ejemplos de procesos de nivel superior, cuya descripción puede explicar los cambios detectados en un nivel inferior, tales como la relativa resistencia de los conquistadores españoles, las transformaciones en las condiciones de vida de los *seringueiros* de la Amazonia brasileña, o las hambrunas que padecieron los nómadas sahelianos. En relación con estos diferentes niveles de procesos, la regla fundamental consiste en no mezclarlos nunca, respetar su autonomía relativa y analizar cada uno de ellos a la escala más apropiada. La confusión de niveles constituye una de las fuentes más comunes de ruido metodológico.

Caracterización estructural del sistema

En los sistemas socioambientales resulta común distinguir entre los elementos sociales, los productivos o propiamente económicos, y los re-

lativos al dominio biofísico. No existe ninguna razón por la cual los elementos que integran el sistema tengan que limitarse a los expuestos. De hecho siempre existirán múltiples formas de construir el modelo, con diferentes configuraciones internas. En todos los casos, conviene resaltar en el análisis el papel fundamental de las *relaciones* entre los elementos, puesto que son dichas relaciones las que contribuyen a definirlos y las que determinan la conducta global del sistema, que no es reductible a la conducta individual de cada uno de los elementos. El conjunto dinámico de estas relaciones es lo que constituye la estructura del sistema.

Las principales propiedades estructurales de un sistema, es decir su *estabilidad, fragilidad, vulnerabilidad y resiliencia*, dependen del tipo de relaciones o conexiones entre sus elementos constitutivos o componentes internos. Algunas de estas relaciones podrían ser destruidas con facilidad, en cuyo caso la estabilidad del conjunto podría verse comprometida. El análisis estructural se puede aplicar también a cualquiera de los elementos, puesto que cada uno representa un subsistema del sistema más amplio y puede ser objeto de un análisis sistémico.

El componente ecológico o biofísico del sistema relacionado con la producción de hule natural en Brasil, sólo es estable cuando los individuos adultos de *Hevea brasiliensis* se presentan bastante distanciados unos de otros. Los riesgos de desestabilización se multiplican en forma exponencial cuando se transgreden umbrales de densidad de uno o dos árboles por hectárea, debido a la creciente vulnerabilidad frente al "Mal das Folhas", una plaga fungal protagonizada por *Microcyclus ulei*. Este hongo coexiste con los árboles de *Hevea* en el contexto de la Amazonia, controlando la densidad de sus poblaciones, pero se encuentra todavía ausente en las plantaciones del Sureste Asiático. Aquí radica la principal razón de su éxito, y el origen de una posible vulnerabilidad futura. La muy baja densidad de la población de árboles del género *Hevea* en la parte meridional de la cuenca amazónica ha tenido implicaciones sociales concretas: la organización productiva debe cubrir una enorme extensión espacial. Existe una relación directa entre este requerimiento y la clásica organización jerárquica ramificada, que distingue entre *seringueiros, seringalistas y aviadores*. Esta última resultaba tan funcional como mecanismo para extender un control laxo a una amplia área

geográfica que se tuvo que reinstaurar durante la segunda guerra mundial, a pesar de sus anacrónicas connotaciones semif feudales.

Tendencias y cambios en los sistemas complejos

La estructura de un sistema complejo tiene su propia historia. Los sistemas experimentan procesos de estructuración y desestructuración que conllevan periodos de estabilidad, cuando resulta fácil predecir situaciones, y periodos de incertidumbre, cuando los nuevos conjuntos de relaciones no se han estabilizado todavía. En ocasiones, el sistema sufre una marcada solución de continuidad, una destrucción completa, o permanece como un relicto casi irrelevante en un nuevo contexto.

La estructura, es decir, el conjunto de relaciones entre los elementos integrantes, explica la capacidad de un sistema para experimentar transformaciones, a partir de las cuales puede emerger una nueva estructura. No sólo son compatibles el análisis estructural y el procesual: no se puede plantear el uno sin el otro. En cualquiera de los casos, el comportamiento del sistema no puede desprenderse en forma mecánica del comportamiento de sus componentes o elementos integrantes. El reconocimiento y la caracterización de las propiedades emergentes del conjunto es lo que justifica precisamente la adopción de un enfoque sistémico.

Campos de posibilidades

Si asumimos un estado de cosas inicial, cabe preguntarse no tanto cuál sería el estado subsiguiente, sino cuál sería el campo de posibilidades reales para el mismo en el marco de una transformación concreta. El cálculo político necesita distinguir con cuidado entre lo deseable, lo posible y lo probable. A partir de este análisis del rango de las posibilidades efectivas, se podrían plantear cambios específicos en las condiciones de contorno que pudieran servir de fuerza motriz para la transformación.

Condiciones de control

Se necesita una intervención externa para prevenir una desestabilización en ciernes o para cambiar el rumbo de una transformación

que ya se está operando. Es válido preguntarse qué cambios son necesarios en las condiciones de contorno o en la constitución de los elementos para reforzar las condiciones de sustentabilidad de un sistema. Cabe recordar que una transformación estructural puede derivar no sólo de una perturbación externa sino también de una amplificación en el rango de fluctuaciones de los elementos internos, que la estructura existente es incapaz de absorber o neutralizar.

Condiciones de observación

El monitoreo y la evaluación del estado de un sistema depende de la observación de un número limitado de variables, que deben establecerse de antemano. El enfoque de sistemas complejos es incompatible con posiciones epistemológicas empiristas, aunque, por supuesto, exige una constante verificación empírica. Por ello las variables escogidas, o los correspondientes observables, no son neutros ni independientes del marco conceptual que se utiliza para el análisis. Los indicadores que se seleccionan pueden tener sin embargo una relativa autonomía que preserva su utilidad cuando se manejan desde marcos conceptuales en competencia.

Un enfoque procesual y sistémico de las relaciones entre la población, las condiciones del desarrollo y el medio ambiente trasciende los intereses científicos y de investigación. Presenta implicaciones prácticas, derivadas sobre todo del reconocimiento de diversos niveles de procesos, que deben incorporarse en el diseño de políticas. En un sentido más profundo, el enfoque mencionado permite replantear en forma transdisciplinaria el concepto de desarrollo sustentable y reforzar su operatividad. En un mundo cuya evolución nos deja cada vez más perplejos, resultaría catastrófico renunciar a utilizar los aportes metodológicos provenientes de la *ciencia de la complejidad*.

Ciudad de México, enero de 1995.

