

Reduccionismo: supongamos que la gallina es un objeto esférico . . .

Santos Bravo Yuste

Profesor Titular de Universidad

Departamento de Física, Universidad de Extremadura, 06071 Badajoz

2 de febrero de 2008

Publicado en *Cátedra Nova* (número 9, páginas 319-327, junio 1999)

1. Introducción

Un granjero decide solicitar el consejo de un biólogo, un ingeniero y un físico para conseguir aumentar la producción de huevos de sus gallinas. Los tres recorren las instalaciones de la granja buscando cómo mejorar el rendimiento. Pasado un tiempo, el granjero recibe las respuestas. El biólogo considera que las gallinas deberían ser mejor alimentadas aumentando para ello su consumo de productos frescos. El ingeniero, describe las deficiencias en la ventilación y propone la redistribución de las jaulas. El físico, en cambio, ataca el problema en su raíz: “supongamos que la gallina es un objeto esférico y homogéneo . . .”, comienza su informe.

¡Ja! Este viejo chiste suele hacer mucha gracia a los físicos. ¿Por qué? Quizás porque nos reconocemos en nuestro colega más de lo que algunos pudieran pensar: estos creen que el chiste es una caricatura cuando nosotros sabemos que es un buen retrato.¹ No hemos de reprocharle a este físico su modo de abordar el problema: ¡a fin de cuentas se ha limitado a iniciar el procedimiento que sus venerables maestros han aplicado durante siglos con excelentes resultados! *Reduccionismo* es el término que aúna a las ideas (¿o ideología?)

¹Incluso nos atreveríamos a decir que el físico era inexperto, porque lo natural es suponer que la gallina es un objeto puntual y sin masa.

que sustentan a este procedimiento tan venerable. Dicho en pocas palabras, el reduccionismo consiste en asumir que el mundo que nos rodea puede ser comprendido en términos de las propiedades de sus partes constituyentes: una vez que hemos descompuesto la Naturaleza en sus componentes y leyes más simples, nuestro objetivo está casi alcanzado, quedando sólo la tarea de recomponer las partes para dar explicación del todo. En la misma naturaleza del reduccionismo está pues implícito el procedimiento que le es propio para resolver problemas científicos:

1. Simplificar el problema descomponiéndolo en problemas más simples mediante la eliminación de lo accesorio.
2. Resolver/entender cada uno de estos problemas más simples.
3. Componer las soluciones de estos problemas simples.
4. Entender el todo, es decir, el problema original.

Este procedimiento nos es tan natural, tiene tan larga tradición Física y, en gran medida, en otras ciencias, que tendemos a asumir sin más reflexión que es indisoluble del método científico. De hecho, es seguro que los cuatro pasos anteriores parecerán obvios, evidentes y sin alternativas a la mayoría de nosotros. Pues bien, este trabajo tiene el propósito de reflexionar sobre estas cuestiones, aparentemente tan claras, a la luz de ciertas ideas de la Física actual procedentes de lo que se conoce como ciencia del Caos y la Complejidad. Dedicaremos una sección al análisis de cada uno de los cuatro pasos enunciados anteriormente e intentaremos mostrar que no son tan evidentes o simples como aparentan.

2. Simplificación

Simplificar los problemas desechando lo irrelevante para reducirlos a su esencia desnuda es el paso previo fundamental en toda actividad científica. Sin duda el físico del chiste era consciente de ello. ¿Lo somos nosotros? Debe notarse que existe cierta tendencia a considerar que la simplificación de un problema implica el reconocimiento de nuestra ignorancia o incapacidad para resolver el problema completo. No se repara, sin embargo, que lo realmente sencillo y cómodo es dejarse vencer por el impulso a no desechar nada de información (“por si acaso resulta ser importante”) y que la simplificación rigurosa de un problema es algo extraordinariamente *difícil* que requiere un conocimiento previo amplio y profundo del problema en cuestión.

Nuestro padre fundador, Galileo, en su estudio de las leyes del movimiento nos dio una hermosa lección sobre cómo simplificar un problema. Por ejemplo, nos hizo notar que a los efectos de su velocidad de caída, y en contra de la opinión de Aristóteles, es irrelevante que un huevo sea de gallina o de mármol [1]. Pero ¿cómo podemos saber “a priori” si este hecho es irrelevante? Galileo nuevamente nos da la —en aquél entonces revolucionaria y ahora natural— respuesta: no hay modo, sólo podemos saberlo preguntando a la Naturaleza, es decir, llevando a cabo un experimento.

Sin embargo, ¿cómo saber si nuestras simplificaciones son insuficientes o demasiado drásticas si es imposible realizar el experimento o bien si la Naturaleza nos responde de un modo estadístico difuso? La primera dificultad —la relacionada con la imposibilidad de experimentar— se da más frecuentemente en las ciencias sociales o en aquellas con contenido “histórico”. Por ejemplo, no es posible (o moral) hacer experimentos económicos o sociales con poblaciones o países; tampoco es posible experimentar con la evolución de las especies, ni, en un ámbito más cercano a la Física, podemos hacer experimentos con el Universo para explicar su evolución desde el Big-Bang. De todos modos, es la segunda dificultad apuntada —la dificultad asociada con la ambigüedad de la Naturaleza cuando responde a nuestras preguntas/experimentos— la que ha sido históricamente más relevante en Física. Volveremos sobre esta cuestión en la sección 5.

3. Entendemos las partes simples

¿Para qué hemos de tomarnos el trabajo —generalmente no trivial como hemos apuntado en la sección anterior— de simplificar el problema? La respuesta parece evidente: si las partes son efectivamente *simples* su *comprensión* debe estar a nuestro alcance. Sin embargo, si reflexionamos un poco sobre lo que significa *comprender* un problema y sobre lo que significa que un problema sea *simple*, la respuesta se torna mucho menos clara de lo que parecía. Porque ¿qué significa resolver o comprender el problema simple? La respuesta ortodoxa es que, en Ciencia, entender algo (un sistema físico, biológico, social) significa que podemos *predecir* su comportamiento. De hecho, como ha señalado Karl Popper, esta capacidad predictiva es la que nos permite distinguir la Ciencia de la pseudociencia.

Con esto establecido, podemos volver sobre la cuestión de qué significa que un problema sea simple. Hay dos respuestas. Una trivial muy antropocéntrica y casi tautológica, que nos dice que el problema es simple porque nosotros lo entendemos. En tal caso, por definición, es imposible no entender el comportamiento de un sistema simple, lo cual no nos lleva muy lejos en

nuestro intento inicial de saber qué significa comprender un problema simple. Otra opción, con aspecto más serio, consiste en considerar que un sistema es simple si no queda nada accesorio por eliminar, es decir, si no es posible simplificarlo aún más sin desnaturalizarlo. Este es el significado que daremos al término sistema o problema *simple*.

Pues bien, es un presupuesto implícito del reduccionismo el asumir que podemos entender los fenómenos complejos a través de la comprensión del comportamiento de sus partes simples —simples en el sentido expuesto más arriba— dado que estas partes simples *deben* ser accesibles a nuestra comprensión . . . Dicho de otro modo, el reduccionismo suele llevar asociado el prejuicio de considerar que los sistemas simples son predecibles y que los sistemas impredecibles lo son por ser complejos. Sin embargo, la asociación “simple \Leftrightarrow predecible” , “complejo \Leftrightarrow impredecible” no es tan unívoca como pudiera parecer:

- Para empezar, existen sistemas complejos que son perfectamente predecibles. Un ejemplo clásico lo constituyen las mareas. Los factores que influyen en su formación (posición de la luna, del sol, vientos, presión atmosférica, corrientes marinas, forma de la costa, . . .) son muy complejos, tanto como los que influyen en el tiempo meteorológico. Sin embargo, de algún modo, aquellos factores conducen a un comportamiento trivial de las mareas que son predecibles con años de anticipación, mientras los factores atmosféricos se confabulan contra los meteorólogos de forma que sus predicciones son poco fiables más allá de unos pocos días a pesar de los ingentes esfuerzos que se invierten en la tarea.
- Por último, y esto es muy sorprendente, hasta hace poco no se ha descubierto² que la asociación “simple \Leftrightarrow impredecible” es perfectamente posible y más habitual de lo que pudiera pensarse. Un ejemplo sencillo de sistema simple e impredecible es el constituido por dos o más bolas en una mesa de billar sin rozamiento: para condiciones iniciales genéricas (no especialmente elegidas) las bolas chocarán de vez en cuando y tras cada colisión será cada vez más difícil *predecir* su posición. Otro ejemplo ridículamente sencillo que podemos analizar con poco más que una calculadora lo constituye un sistema cuya dinámica venga descrita por la ecuación $x_{n+1} = 4x_n(1-x_n)$. Es fácil ver que esta ley de evolución tan *simple* nos permite, sin más que saber sumar y multiplicar, conocer el estado posterior x_{n+1} de nuestro sistema si conocemos su estado actual x_n , dado que la ley de evolución es completamente determinista.

²Poner esto de manifiesto ha sido mérito de lo que se ha venido a llamar Ciencia del Caos.

Sin embargo, la dinámica del sistema regido por esta ley tan simple es extraordinariamente complicada e impredecible: es un sistema caótico [2].

4. Componemos las soluciones parciales

Este paso está implícito en el paso anterior: nuestro problema original es complejo y, al descomponerlo en partes más simples, esperamos que el comprender las partes nos sirva para comprender el todo. Esta tarea de composición de las partes para llegar al todo es generalmente una labor muy complicada. Para empezar, son escasos los sistemas (sistemas conocidos como lineales) en los que sus partes interactúan de un modo trivial. Habitualmente los sistemas son no lineales, de modo que no es posible entender las propiedades del todo a través de la simple suma de las propiedades de las partes debido a que en el proceso de recomposición aparecen interacciones complejas entre ellas. Este obstáculo de tipo “práctico” es el que, en última instancia, nos impide establecer la conexión entre el comportamiento de los átomos —cuyas leyes conocemos— con el de las moléculas orgánicas, para a continuación explicar la formación de las células, los organismos pluricelulares, las plantas, los animales, los hombres, la psicología, la sociología, ...

Estas consideraciones nos llevan a una cuestión que hasta hace poco no tenía el marchamo de pregunta científica seria y que era arrojada a las tinieblas de la especulación seudofilosófica, a saber, la cuestión de cómo es posible que surja un mundo tan, tan complejo del seno de unas leyes físicas comparativamente tan simples. Para muchos esta es la cuestión más profunda, es el enigma a resolver [3].

5. Entendemos el problema original

Si hemos tenido éxito en los pasos anteriores —a pesar de las dificultades que tal proceso conlleva, según hemos ido viendo— esperamos, por fin, resolver nuestro problema inicial. Por supuesto, por resolver entendemos, y de esto ya hablamos en la sección 3, que el problema no esconde misterio para nosotros en el sentido de que sabemos dar explicación de sus características y de que podemos *predecir* su evolución. A fin de cuentas, la Física no es más que una ciencia experimental en la cual las *predicciones* teóricas se contrastan con los experimentos. Volvemos a la idea ya discutida: en Física y en la Ciencia en general, el término “predicción” es esencial. Y sin embargo, ¡su

significado no es en absoluto evidente! De hecho, su significado ha cambiado históricamente y sigue cambiando en la actualidad. Estos cambios están siendo impulsados por los problemas planteados desde la ciencia del Caos y de la Complejidad. Repasemos brevemente la evolución del significado de este término.

5.1. Predicción clásica o de Newton-Laplace

Esta interpretación es bien conocida: el estado de un sistema en un instante t es descrito por un vector $X(t)$ de N componentes cuya evolución viene determinada por una ecuación, digamos $dX/dt = G(X(t))$; una vez descubierta la ley de evolución G del sistema y conocido el estado del sistema en algún instante inicial, su estado posterior es perfectamente *predecible* en el sentido de que podemos conocer cuál es el valor del vector X en cualquier otro instante. Laplace lo explicaba de un modo más sugerente [4]:

Un ser inteligente que en un instante dado conociera todas las fuerzas que animan la Naturaleza y las posiciones de los seres que la forman, y que fuera lo suficientemente inmenso como para poder analizar dichos datos³, podría condensar en una única fórmula el movimiento de los objetos más grandes del universo y el de los átomos más ligeros: nada sería incierto para dicho ser; y tanto el futuro como el pasado estarían presentes ante sus ojos.

Pongamos un ejemplo sencillo de esta interpretación. Imaginemos una caja que contiene un gas compuesto por M moléculas y que en una de sus caras tiene un pequeño agujero. Según la interpretación clásica, si conociéramos las fuerzas que ejercen entre sí las moléculas (es decir, si conociéramos G) y sus posiciones y velocidades en un instante dado, entonces podríamos conocer, por ejemplo, cuándo y con qué velocidad una determinada molécula escapará por el agujero. Si en ese instante la molécula no escapa o lo hace con velocidad distinta a la predicha, habríamos de concluir que nuestra teoría, es decir, la forma que hemos atribuido a G , no es correcta. Por supuesto, damos por cierto que somos tan —en palabras de Laplace— inmensos que podemos (i) resolver la ecuación del movimiento de las M moléculas y (ii) conocer con infinita precisión su posición y velocidad iniciales.

No hay duda de que con esta interpretación, el significado de “predecir” es muy claro. Sin embargo, salvo para unos pocos sistemas reales, este punto de vista es inaplicable aunque sólo sea porque, ¡ay!, nuestra inteligencia y habilidad no es precisamente inmensa . . . Por ejemplo, incluso para un valor

³Este ser tan extraordinario es conocido como *demonio de Laplace*

de M tan pequeño como tres, y siendo G una ley nada complicada desde el punto de vista matemático como la ley de Newton de la gravitación, resulta que dar cuenta de la evolución de ese sistema es terriblemente difícil.⁴ El procedimiento utilizado por la ciencia para hacer frente a estas situaciones no abordables desde el punto de vista clásico ha consistido en la introducción de consideraciones y conceptos probabilísticos, lo que, en última instancia, ha implicado el cambio del significado de lo que entendemos por *predecir*.

5.2. Predicción mecánico-estadística y predicción en sistemas caóticos

Puesto que no somos ni inmensamente hábiles ni inmensamente inteligentes, si en la caja del ejemplo anterior hubiera un número grande de moléculas (por ejemplo, M del orden de 10^{23}), no hay duda de que la predicción de su evolución —en el sentido que hemos expuesto en la sección anterior— es imposible. Sin embargo, aunque no podemos predecir qué moléculas y con qué velocidad saldrán en un instante dado de la caja, si podemos *predecir* algo menos fuerte, más tenue, a saber, cuántas salen en promedio y cuál es la distribución de probabilidad de sus velocidades (esto es, la probabilidad de que cada molécula salga con una velocidad comprendida entre ciertos valores).⁵

Hemos visto que la razón última de esta debilitación del concepto de descripción (o, equivalentemente, de predicción) del estado de un sistema nacía del elevado número de sus grados de libertad (esto es, del elevado número de componentes del vector $X(t)$ que lo describe). Por ello, ha resultado sorprendente descubrir que existen multitud de sistemas (llamados caóticos) con un número reducido de grados de libertad para los cuales la predicción en el sentido de Newton–Laplace es tan imposible como en nuestro ejemplo de las $M \sim 10^{23}$ moléculas encerradas en la caja. Una característica principal de estos sistemas es su enorme sensibilidad a las condiciones iniciales (“el efecto mariposa”): el sistema evolucionaría de forma completamente distinta si su estado inicial cambiase levísimamente. En estos sistemas, salvo si pudiéramos conocer sus condiciones iniciales con precisión infinita, la predicción de su estado final (según la definición clásica) es imposible, y ello a pesar de que la ley de evolución G es determinista e incluso pudiera ser matemáticamente muy simple.

En resumen, bien porque la computación de la evolución del sistema sea

⁴Nótese que lo que he descrito no es nada más que el famoso *problema de los tres cuerpos*.

⁵Para algunos esta es una definición tan descafeinada de predicción que no están dispuestos a considerarla como tal.

inabordable, bien porque desconozcamos las condiciones iniciales con precisión infinita, nos vemos abocados a abandonar, por inútil, la interpretación clásica del término “predicción”. Hemos de restringirnos a una interpretación probabilística que al menos puede sernos de utilidad: dada la ley de evolución G del sistema, al menos somos capaces de explicar el *comportamiento* del sistema, es decir, la probabilidad $P_G(X)$ de que su estado final sea justamente X y, por tanto, *predecir* cuán probables son unos estados finales frente a otros.

5.3. Predicción en sistemas complejos

El significado que, dentro del ámbito científico, un alumno de bachillerato asignará al término “predicción” será casi en exclusiva⁶ el propio de la interpretación clásica de Newton–Laplace, simplemente porque es la interpretación característica del tipo de Ciencia que habrá estudiado. La interpretación probabilística descrita en la sección anterior sólo suele pertenecer al acervo cultural de los estudiantes de “ciencias” que han cursado estudios relacionados con la Mecánica Estadística o los sistemas caóticos. Sin embargo, la interpretación que vamos a exponer en esta sección es muy poco conocida incluso para científicos profesionales y ha surgido como respuesta a la necesidad de *predecir* el comportamiento de sistemas en los cuales el punto de vista mecánico-estadístico es insuficiente [5]. Este tipo de sistemas suelen conocerse como sistemas complejos. No hay una definición precisa ampliamente consensuada de lo que se debe entender por “sistema complejo”; no obstante, siguiendo la referencia [5], lo describiremos como un sistema en el que su *comportamiento* $P_G(X)$ depende crucialmente de los detalles del sistema. Dicho en otras palabras: en estos sistemas sucede que pequeñas variaciones en la ecuaciones del movimiento G dan lugar a comportamientos completamente distintos. Debe reflexionarse sobre lo que esto implica: recuérdese como la sensibilidad de un sistema a las condiciones iniciales X nos llevaba a superar la interpretación determinista (o clásica) del término predicción y a dotar a este término de un significado más laxo, reducido a la capacidad de predecir el *comportamiento* $P_G(X)$ del sistema (es decir, a predecir la distribución de probabilidades de los valores posibles de X); de igual modo, la sensibilidad de un sistema a la forma de sus ecuaciones de evolución G , hace que sea absurdo intentar conocer el comportamiento de dicho sistema: hemos pues de superar la interpretación mecánico-estadística del término predicción, dotar a este término de un significado aún más laxo, y reducir (al menos para los

⁶Quizás también haya podido aprender algo sobre la interpretación probabilística propia de la Física Cuántica.

sistemas complejos) su significado a la capacidad de predecir la distribución de probabilidades de los comportamientos posibles del sistema, $\mathcal{P}[P_G(X)]$, es decir, a la capacidad de predecir . . . ¡la distribución de probabilidad de las distribuciones de probabilidad de los estados finales X posibles del sistema!

6. Conclusiones

En las secciones anteriores hemos presentado la secuencia de pasos usualmente necesarios para resolver un problema según nos dicta el reduccionismo, ese conjunto de presupuestos de aspecto tan evidente que han sido parte inseparable de la Física y, en gran medida, de toda la Ciencia. En este trabajo hemos reflexionado sobre ellos intentando mostrar algunas de sus dificultades. En forma resumida, estos pasos y sus dificultades son:

1. Reducir el problema a partes más simples . . . pero simplificar requiere (casi) resolver el problema para saber qué es lo accesorio.
2. Conocer el comportamiento de los partes simples . . . pero sistemas extremadamente simples pueden ser caóticos, es decir ininteligibles (en el sentido de Newton-Laplace).
3. Componer las soluciones simples . . . pero probablemente las interrelaciones entre las partes serán no lineales por lo que no es viable la mera superposición de las soluciones simples.
4. Entender el problema completo . . . pero en Ciencia entender es predecir y hemos visto que el significado del término “predecir” no es tan diáfano como en principio pudiera parecer; de hecho su significado ha tenido que evolucionar para adaptarse a los problemas planteados por los sistemas no clásicos, a saber, sistemas mecánico-estadísticos y sistemas complejos.

¿Sobrevivirá el reduccionismo como rey absoluto de la Ciencia? Su posición parece sólida porque sus logros son, han sido y, con toda seguridad, seguirán siendo enormes. Sin embargo, hay grandes fuerzas procedentes del campo de los sistemas caóticos y complejos que lo atacan y pugnan por desplazarlo de su actual posición hegemónica. Veamos un ejemplo de estos ataques [6]:

La comprensión de la naturaleza de la energía nos ha proporcionado la comodidad de la sociedad tecnológica. Sin embargo, nuestra incapacidad para comprender la complejidad de los sistemas ecológicos ha puesto en peligro gran parte de nuestro mundo [. . .]

La comprensión de la naturaleza de la enfermedad nos ha conducido a un aumento significativo de la duración de nuestra vida [...] Sin embargo, nuestra incapacidad para comprender la mente humana ha deteriorado marcadamente la calidad de vida de un número significativo de aquellos mismos individuos que ahora viven más tiempo. Nuestro dominio de las ciencias físicas reduccionistas nos ha permitido beneficiarnos de las cosas cuantitativas del mundo, pero no parece habernos beneficiado en aquellas cosas que cualitativamente afectan a nuestras vidas. ¿Admitirá la ciencia futura modelos no reduccionistas? ¿Será capaz de comprender fenómenos verdaderamente complejos como las interacciones entre personas?

El estatus futuro del reduccionismo —*primus inter pares* o rey sol— dependerá de su capacidad para dar respuesta a las preguntas que, como las que acabamos de referir, son formuladas desde los ámbitos de los sistemas complejos. La batalla se presume muy interesante y su resultado —dejando aparte la vertiente práctica de la resolución de problemas— tendrá un impacto duradero en nuestra cultura. Permanezcamos atentos al desarrollo de las hostilidades.

Referencias

- [1] Galileo Galilei *Diálogos sobre dos nuevas ciencias*, citado por L. Krauss *Fear of Physics: a Guide for the Perplexed*, (Vintage, Londres, 1996).
- [2] H-O Peitgen, H. Jürgens y D. Saupe, *Chaos and Fractals: New Frontiers of Science*, (Springer-Verlag, Nueva York, 1992).
- [3] P. Bak, *How Nature Works*, (Springer-Verlag, Nueva York, 1996).
- [4] Pierre Simon de Laplace, *Ensayo filosófico sobre las probabilidades*, citado por I. Stewart, *¿Juega Dios a los dados?*, (Editorial Crítica, Barcelona, 1991).
- [5] G. Parisi, *Complex Systems: a Physicist's Viewpoint*, *Physica A*, **263**, 57-564 (1999).
- [6] B. J. West y B. Deering, *The Lure of Modern Science: Fractal Thinking*, (World Scientific, Singapur, 1995).