EPISTEMOLOGÍA E HISTORIA DE LA CIENCIA

SELECCIÓN DE TRABAJOS DE LAS XVIII JORNADAS
VOLUMEN 14 (2008)

Horacio Faas
Hernán Severgnini

Editores

ÁREA LOGICO-EPISTEMOLÓGICA DE LA ESCUELA DE FILOSOFÍA
CENTRO DE INVESTIGACIONES DE LA FACULTAD DE FILOSOFÍA Y HUMANIDADES
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

¿Es realmente determinista la teoría del caos?

Cecilia Bejarano[*] y Martín Narvaja[†]

"Ainsi il n'y a rien d'inculte, de stérile, de mort dans l'univers, point de chaos, point de confusion, qu'en apparence"

G. W. Leibniz.

1. Introducción

La cuestión del determinismo puede enunciarse como la pregunta por la medida en que cierta necesidad rige el acaecer de eventos futuros. Tratada ya por Aristóteles en su *Física*[1], en el contexto de la ciencia moderna la cuestión pasó del plano ontológico al de la epistemología y el determinismo fue adoptado como principio metodológico ligado al modelo mecanicista. Durante el siglo XX, con el surgimiento de la física cuántica y posteriormente de la teoría del caos, el problema retomó en gran medida su cauce original.

El presente ensayo analiza el estatus del determinismo como tesis metafísica con respecto a los sistemas de que da cuenta la teoría del caos. Fundamentalmente discutiremos dos cuestiones: la relación entre caos y determinismo y entre éste último y el azar. Los conceptos de azar y determinismo, sus variedades y relaciones serán cruciales. Sostendremos la tesis de que el caos no rompe por sí con la concepción determinista de la naturaleza. Argumentaremos, finalmente, que es menester considerar la relación entre la teoría, en su formulación matemática, y la realidad física a que pretende aplicarse.

2. Determinismo

A fines del siglo XVIII, Laplace concibió que una inteligencia capaz de conocer el estado de todos los cuerpos del universo y las fuerzas actuando entre ellos en un instante, y de someter tales datos a análisis, podría conocer con certeza el estado correspondiente a los demás instantes, previos y posteriores[2].

Si se pretende enunciar la tesis determinista en términos ontológicos, como tesis metafísica, este enfoque no es satisfactorio. Dicha inteligencia debe ser posible como consecuencia de que el mundo es determinista y no a la inversa. La tesis determinista sostiene que dadas las cosas tal cual son, sólo hay un modo posible en que pueden evolucionar; que el futuro, no menos que el pasado, está determinado por el presente. William James expresó esta idea sosteniendo que el determinismo afirma que aquellas partes del universo ya establecidas decretan de modo unívoco lo que las otras partes deberán ser[3].

John Earman desarrolló la propuesta de James utilizando la noción de *mundos posibles*[4] definiendo así dos sentidos de determinismo. Un mundo M es determinista en sentido *laplaciano* si y sólo si: dado el conjunto Ξ de mundos posibles y cualquier otro mundo M' que también pertenezca a Ξ, si M y M' coinciden en un cierto instante, entonces coinciden en todos. En otras

[*] Instituto de Astronomía y Física del Espacio (IAFE), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (Conicet), Universidad de Buenos Aires (UBA).

[†] Universidad del Centro Educativo Latinoamericano (UCEL). Este artículo forma parte de la investigación sobre Fundamentación de la mecánica cuántica y de su relación con el mundo químico, subvencionada por la UCEL

palabras, dos mundos deterministas cuyos estados coinciden en un instante no son sino el mismo mundo. En segundo lugar, dirá, un mundo *M* es determinista en el sentido *histórico* si y sólo si: dado el conjunto Ξ de mundos posibles y cualquier otro mundo *M'* que también pertenezca a Ξ, si *M* y *M'* coinciden en un cierto instante, entonces coincidirán en todo instante posterior. Naturalmente, si un mundo es determinista en el sentido *laplaciano*, también lo es en el sentido *histórico*.

La clave de estas definiciones es que lo que permite construir los conjuntos de mundos posibles son Leyes o regularidades determinadas. Si las leyes son de cierto tipo, ocurrirá que en tales conjuntos una coincidencia instantánea entre dos mundos implique su identidad, coincidencia futura, o ninguna de ambas. Los mundos posibles son *mundos físicamente posibles de acuerdo a determinadas leyes*.

Considerando que enunciados con diversos grados de precisión pueden ser simultáneamente verdaderos, puede formularse otro par de conceptos de determinismo, uno de los cuales denominaremos débil y otro fuerte. Ilustremos esto con un ejemplo: si hablamos de la localización de alguien podemos decir que se encuentra en el planeta Tierra, en América, en Argentina, en Buenos Aires, etc. En principio, cabría suponer que la realidad descripta no depende del nivel de descripción, que las descripciones se relacionan con una realidad única *de características bien definidas*. Así ocurre en general.

Diremos que un mundo es determinista *en sentido fuerte* si, dada una descripción verdadera del estado del mundo con cualquier grado de precisión, es posible determinar sus demás estados con el *mismo grado* de precisión original. Un mundo será determinista *en sentido débil* si, en caso de tener el estado inicial expresado con precisión absoluta, los estados subsiguientes quedan determinados unívocamente con igual precisión. Es sencillo ver que el segundo sentido es un caso particular del primero. Si un mundo es determinista en sentido fuerte lo es también en el débil.

Tenemos pues dos pares de conceptos: el primer par comprende al determinismo laplaciano (**A**) y al determinismo histórico (**B**); el segundo distingue entre el determinismo *en sentido fuerte* (***a***) y *en sentido débil* (***b***). Hemos dicho que si un mundo es determinista **A** es también determinista **B**, y que si es determinista ***a*** es también ***b***. Veremos ahora qué ocurre con las combinaciones **Aa**, **Ab**, **Ba** y **Bb**.

Un mundo es **Aa**, es decir, *determinista laplaciano en sentido fuerte* si, dado el conjunto Ξ de mundos posibles y cualquier otro mundo *M'* que también pertenezca a Ξ, si las descripciones verdaderas de *M* y *M'* coinciden en un cierto instante en algún nivel de descripción, entonces lo harán en todo otro instante en todo nivel. Un mundo es **Ab** si y sólo si la coincidencia en la descripción infinitamente precisa de *M* y *M'* implica la coincidencia de ambos mundos en todos los instantes restantes, en este mismo nivel de descripción. Si un mundo es **Aa**, es también **Ab**.

Un mundo es **Ba**, es decir, *determinista histórico en sentido fuerte* si y sólo si dado el conjunto Ξ y cualquier otro mundo *M'* que también pertenezca a Ξ, si las descripciones verdaderas de *M* y *M'* coinciden en un cierto instante en algún nivel de descripción, entonces coincidirán en todo instante posterior con el *mismo grado* de precisión original. Un mundo es **Bb** si y sólo si la coincidencia en la descripción infinitamente precisa de *M* y *M'* implica la coincidencia de ambos mundos en todos los instantes posteriores, en este mismo nivel de descripción. Si un mundo es **Ba**, es también **Bb**.

Como es evidente, si un mundo es determinista en el sentido **Aa** también lo será en los restantes –**Ab, Ba y Bb**–. Si es **Ab**, también será **Bb**, pero no necesariamente **Ba**. Que un mundo sea **Ba** sólo implica que sea **Bb**. Por último, el determinismo de tipo **Bb** no implica ningún otro tipo de determinismo[5].

Si existieran *de hecho* conjuntos de mundos deterministas sólo en sentido débil, descripciones de distintos niveles no podrían asociarse ya a una realidad de características independientes a dicho nivel.

3. Azar

En el capítulo IV de *Ciencia y Método*[6] Henri Poincaré se pregunta qué es el Azar e identifica tres clases de situaciones en las que lo atribuimos a un fenómeno. En primer lugar, sostiene, decimos que son azarosos aquellos fenómenos *sensibles a las condiciones iniciales*, entre los cuales se destacan aquellos en los que encontramos sistemas físicos en estado de equilibrio inestable. En estos casos, diferencias inapreciables en las condiciones iniciales producen enormes diferencias en los estados ulteriores. Ejemplos de esto son: un péndulo invertido o el resultado de una tirada ruleta; mínimas diferencias en la posición inicial del péndulo o una diferencia muscularmente inapreciable en el *crupié* producirán un resultado sensiblemente distinto.

En segundo lugar, el azar se presenta en la denominada *complejidad*. Aquí, el azar surge de una sucesión de efectos imperceptibles individualmente pero numerosos al punto de propagarse ampliamente. Ejemplo de dichas situaciones es el de un conjunto de partículas en un gas: una pequeña variación en la trayectoria de una partícula, modificará las de aquellas con las que choque, las cuales chocarán con otras cuyas trayectorias también serán alteradas, etc.; la trayectoria de cada una de las partículas individuales es, por ello, azarosa.

El azar en estos casos es de naturaleza gnoseológica. Si pudiéramos conocer con absoluta precisión el estado inicial, en el primer caso, y la multiplicidad de las causas que intervienen, en el segundo, podríamos conocer los estados subsiguientes.

En tercer lugar, el azar aparece como efecto de la relación accidental entre eventos que caen dentro de teorías o explicaciones independientes. Poincaré ofrece el siguiente ejemplo: "Un hombre pasa por las calles dirigiéndose a sus negocios; alguien que estuviera al tanto de los mismos, podría decir con qué motivo ha salido a tal hora, por qué ha pasado por tal calle. Sobre un techo trabaja un pizarrero, el empresario que lo dirige podrá, en cierta medida, prever qué es lo que va a hacer. Pero el hombre no piensa en el pizarrero ni el pizarrero en el hombre; parecen pertenecer a dos mundos completamente extraños el uno al otro. Sin embargo, el pizarrero deja caer una pizarra que mata al hombre. No se dudará en decir que esto es un azar"[7].

Lo cierto es que dividimos al universo en pedazos, tratamos de hacerlo lo menos artificialmente posible pero a veces dos de esos pedazos se cruzan y lo que entonces ocurre es algo que no cabe llamar sino casualidad. Este azar es esencialmente ontológico, establecido un conjunto de leyes determinado, siempre es posible encontrar preguntas que asocian eventos independientes y que carecen de explicación dentro del marco de aquellas leyes[8].

Sea la sensibilidad a las condiciones iniciales Azar **1**, la complejidad, Azar **2** y la casualidad Azar **3**. El **Azar 1** y el **2** son independientes. La evolución del estado de un péndulo invertido es sensible a las condiciones iniciales sin ser un fenómeno complejo, en tanto que el famoso *problema de los tres cuerpos* es complejo sin ser sensible a las condiciones iniciales. El **Azar 3**, es compatible con ambos. Si tomamos dos péndulos, las distancias entre ambos, que en algunos casos podrían resultar constantes, no se explican sólo a partir de las leyes del péndulo, algo análogo podría darse con dos tríos de cuerpos. Lo importante aquí no es la existencia de regularidades, sino la carencia de leyes que expliquen dichas regularidades. En todos estos casos las casualidades carecen de explicación dentro del marco de las leyes dinámicas que rigen el movimiento de los sistemas mencionados.

En relación con el determinismo, la sensibilidad a las condiciones iniciales, no es compatible con **Ba**, pues la coincidencia instantánea de las descripciones de los estados de dos Mundos en algún nivel no implica su coincidencia ulterior en el nivel de descripción original sino más bien lo contrario; hemos visto que diferencias inapreciables en el instante inicial se vuelven apreciables luego. En consecuencia, el **Azar 1** tampoco es compatible con **Aa.** Por otra parte, esta clase de Azar puede conjugarse con los determinismos **Ab** y **Bb.** Lo mismo ocurre con respecto al **Azar 2**. Las casualidades, finalmente, son compatibles con **Aa,** el determinismo más fuerte, y en consecuencia con todos los demás.

4. Caos

La Mecánica adquirió su primera formulación sistemática en 1686 al publicarse los *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. Posteriormente, Lagrange y Hamilton elaboraron formulaciones alternativas equivalentes a la newtoniana y entre sí para sistemas de referencia en el espacio euclídeo de tres dimensiones: las mecánicas Lagrangiana y Hamiltoniana.

A partir de dichas reformulaciones, mecánicas analíticas, es posible estudiar la dinámica de sistemas físicos en el *espacio de las fases*. En tal espacio abstracto cada punto representa el posible estado de un sistema. Su dimensionalidad, para un sistema de **n** grados de libertad, es de **6n** dimensiones. En él, una trayectoria representa la evolución dinámica de un sistema de manera que cada punto suyo corresponde al estado instantáneo dicho sistema. El conjunto de las posibles trayectorias de un sistema se denomina "retrato" de sus estados.

Los beneficios de la introducción del espacio de las fases se hacen patentes en el tratamiento de problemas dinámicos no lineales cuya resolución por métodos analíticos es ardua o imposible. Su utilización como herramienta para el tratamiento de la dinámica de sistemas físicos altamente inestables fue introducida originalmente por Henri Poincaré, quien, imponiendo un punto de vista más cualitativo que cuantitativo para el estudio de problemas complejos, sentó las bases del método geométrico, hoy ampliamente difundido.

Una de las nociones fundamentales en el estudio de los sistemas caóticos es la de *atractor*. Se llaman *atractores* a aquellas zonas del espacio de las fases hacia las que tienden a converger trayectorias vecinas con el paso del tiempo. En el caso sistemas que tienden al reposo, estas trayectorias convergen en lo que se denomina *punto fijo*; cuando tienden a recorridos periódicos convergen en *ciclos límites*. Los atractores poseen fundamentalmente tres propiedades: son un *conjunto invariante* -cualquier trayectoria que comienza en ellos permanece allí, *atraen un conjunto abierto de condiciones iniciales* - es decir, a todas las trayectorias que comienzan lo suficientemente cerca suyo- y es *un mínimo* - no hay en él subconjuntos propios que cumplan con las propiedades mencionadas[9].

Aquí es conveniente mencionar la distinción entre sistemas conservativos y no conservativos o disipativos. En los primeros, la energía total se conserva durante su evolución; en los últimos, la energía del sistema disminuye con el transcurso del tiempo y, consecuentemente, el volumen del espacio de las fases que le corresponde. En el caso de los sistemas disipativos caóticos, la sensibilidad a las condiciones iniciales se combina con la mencionada reducción del volumen del espacio de las fases correspondiente al sistema. En consecuencia, los sistemas caóticos disipativos no se instalan en puntos fijos ni en ciclos límites, sino que tienden hacia atractores *extraños*.

Las primeras aplicaciones de la llamada teoría del caos datan de 1963, de las investigaciones de Lorenz acerca de la posibilidad de encontrar un modelo explicativo-predictivo para los fenómenos del clima atmosférico[10]. Se había dado así con sistemas cuyas trayectorias en el espacio de las fases presentaban movimientos sobre un atractor extraño. Las soluciones de las ecuaciones dinámicas de tales sistemas nunca alcanzan el equilibrio ni estados periódicos, sino que oscilan de forma irregular y aperiódica. El retrato del sistema estudiado por Lorenz forma las conocidas *alas de mariposa*. En la década siguiente, estas ideas se aplicaron a diversos fenómenos en física, química y biología. Posteriormente, el caos rebasaría los límites del ámbito estrictamente científico[11].

Los sistemas caóticos presentan un *comportamiento aperiódico*, debido a su *no linealidad*. También presentan *sensibilidad a las condiciones iniciales*, trayectorias cercanas se separan exponencialmente. Tales características son bien conocidas, sin embargo, no es sencillo encontrar una definición satisfactoria para el caos[12].

Las ecuaciones de la teoría del caos, cuyas soluciones representan los estados de un sistema, son ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales[13]. Esta no linealidad implica la invalidez del principio de superposición, no toda combinación lineal o suma de dos soluciones es también una solución[14]. Así, un sistema presenta comportamiento caótico si las soluciones del sistema de ecuaciones no lineales que describe su dinámica oscilan aleatoriamente de forma irregular y aperiódica con alta sensibilidad a las condiciones iniciales. De este modo, la imposibilidad física de determinar con precisión el estado de un sistema implica una restricción de posibilidad de predicción quedando acotada a un corto plazo, luego del cual el comportamiento del sistema resulta completamente imprevisible. Sin embargo, la medida de tal plazo es bien conocida. A diferencia de lo que ocurre con fenómenos meramente aleatorios, el caos presenta un orden subyacente, tras la complejidad puede descubrirse una estructura.

5. Determinismo y Caos

Aun no habiendo presentado una definición precisa de "caos", hemos desarrollado los conceptos implicados en la formulación de nuestra pregunta inicial. Resta pues responder: ¿Es realmente determinista la teoría del caos? En el sentido débil sí, la teoría del caos es una teoría determinista, pero no en el sentido fuerte. Esta posibilidad de dar dos respuestas distintas a la pregunta por el determinismo es lo específicamente novedoso del Caos en relación con la cuestión del Determinismo.

Si consideramos que toda imprecisión en la determinación del estado instantáneo de un sistema físico es puramente epistemológica y carente de implicaciones ontológicas, la dinámica de los sistemas caóticos es determinista. No podría ser de otro modo ya que las soluciones de las ecuaciones no lineales de la Teoría del Caos evolucionan unitariamente[15]. Por otra parte, si pensamos que los estados de los sistemas caóticos no pueden precisarse *jamás* sino con un margen de error acotado, su evolución es azarosa (en los sentidos 1 y 2) y, en consecuencia, no determinista.

Habitualmente la mutua implicación entre ambos determinismos permite aseverar que las limitaciones epistemológicas carecen de repercusión ontológica, pero como esto no ocurre en el caso que nos ocupa, surge otra cuestión: ¿Qué nivel de descripción es el propiamente ontológico? ¿La *naturaleza física* descripta por la teoría del caos es determinista o no? El problema puede enunciarse con mayor precisión recurriendo al concepto de granularidad. la teoría del caos es indeterminista en todos los grados de precisión o "granulados" exceptuando el nivel límite de la precisión infinita. Pero ¿Cuál es el nivel de precisión, o granulado, al que cabe llamar *real*? Si la respuesta es "El nivel en el cual los sistemas poseen estados determinados con precisión matemática infinita", la teoría del caos describe una naturaleza determinista; en cualquier otro caso, no.

La teoría del caos es compatible tanto con mundos deterministas como con mundos no deterministas. Esto es: la cuestión del determinismo queda irresuelta por el mero análisis de las características formales de la teoría del caos. Es menester considerar la relación entre la teoría, en su formulación matemática, con la realidad física de que pretende dar cuenta.

6. Conclusión

Las conclusiones que pueden extraerse de lo expuesto son varias. En primer lugar, la pregunta por el determinismo en la teoría del Caos suele responderse negativamente apelando a la imprevisibilidad de la dinámica de los sistemas caóticos. De acuerdo con las secciones iniciales, tal respuesta es conceptualmente insuficiente. Si bien la imposibilidad de predicción se encuentra emparentada al azar que presentan los sistemas inestables y complejos, tal azar sería *en principio* compatible con una concepción débil del determinismo. En segundo lugar, hemos señalado que las ecuaciones que rigen la dinámica de los sistemas caóticos, pese su no linealidad y otras particularidades, son *de hecho* compatibles con el determinismo débil.

Estas conclusiones permiten destacar la singularidad de la teoría del caos con respecto a otras teorías desarrolladas en el marco de la física clásica: en estas últimas el determinismo débil y el fuerte van de la mano; en la primera, esto no sucede. La teoría del caos es determinista sí, pero sólo en un nivel de descripción. En tal sentido, podemos ofrecer un esbozo de definición del caos: un sistema es caótico si presenta una dinámica determinista *en sentido débil*, y azar en los sentidos 1 y 2.

La pregunta que queda planteada es a qué nivel de descripción cabe llamar *real*, qué nivel corresponde a los *sistemas físicos caóticos*. Creemos que la respuesta no es trivial y su justificación exige la introducción explícita de enfoques filosóficos, epistemológicos, físicos y metafísicos.

Notas

1 Aristóteles, *Física*, Libro II.
2 Laplace, P., *Ensayo Filosófico sobre las Probabilidades*, 1985, página 25.
3 James, W., *The Dilemma of determinism*, 1956, página 150.
4 Earman, J., *A primer on* Determinism, 1986, Capítulo II.

[5] Estos últimos párrafos pueden resultar un poco farragosos. Son, sin embargo, necesarios.
[6] Poincaré H., *Ciencia y Método*, 1946.
[7] Poincaré H., *Ciencia y Método*, 1946, p. 64.
[8] Sobre estas cuestiones puede consultarse Narvaja, M., 2007.
[9] Para una exposición detallada, confrontar Lombardi, O., *El problema del Determinismo en la Física*, Capítulo III.
[10] Carpa F., *La trama de la vida*, 1998.
[11] Idem.
[12] Batterman R., *Defining Chaos*, 1993.
[13] El lector interesado en la dinámica no lineal puede consultar Strogatz, *Nonlinear dynamics and chaos*, 1994.
[14] La herramienta más poderosa para este tipo de problemas es el enfoque geométrico ya mencionado.
[15] Un operador unitario se define sobre un espacio de Hilbert tal que $U U^+ = U^+ U = I$ $(U^+ = (U^*)^T)$.

Bibliografía

Aristóteles, *Física*, Libros I-II. Trad. y comentario de M. Boeri, Biblos, Buenos Aires, 1993

Batternan, R. "Defining Chaos", *Philosophy of Science*, Vol 60, pp 43-66, 1993

Carpa, F. *La trama de la vida*, Anagrama, Barcelona, 1998.

Earman, J. *A primer on determinism*, Reidel Publishing Company, Boston, 1986.

James, W. "The Dilemma of Determinism", en *The Will to Believe*, Dover Publications, New York, 1956.

Laplace, P. *Ensayo Filosófico sobre las Probabilidades*, Alianza, Madrid, 1985

Lombardi, O. "¿Es la mecánica clásica una teoría determinista?", *Theoria*, Vol. 17, pp. 5-34, 2002

Lombardi, O. *El problema del Determinismo en la Física*, Tesis Doctoral, presentada en Abril de 2001.

Narvaja, M. *Determinismo y Azar en la Física de Aristóteles*. Presentado en el XIV Congreso Nacional de Filosofía (AFRA), 2007

Poincaré, H. *Ciencia y Método*, Espasa Calpe, Buenos Aires, 1946.

Strogatz, S. *Nonlinear dynamics and chaos*, Perseus Publishing, Cambrigde, 1994.