

AZAR, PROBABILIDAD Y LEY

1. ORDEN Y AZAR

1.1. *El enemigo*

La mayoría de la gente teme el caos y ama el orden. Incluso los amantes de la aventura, la gente con afición por la novedad y coraje para enfrentarla, cuentan con el orden del mundo, pues de lo contrario planearían sus actos sin resultado. Incluso quienes combaten un orden determinado, sea en la naturaleza o en la sociedad, se proponen remplazarlo por un orden de otra clase. Las excepciones son casos psiquiátricos. El caos es el principal enemigo de toda persona normal.

Sin embargo, no hay orden perfecto, ni siquiera entre las estrellas, que han sido consideradas tradicionalmente como modelos de orden y por lo tanto dechados de perfección. Tampoco existe el caos perfecto, ni siquiera en asuntos humanos. Si desaparece una pauta emerge otra, si un suceso casual inclina la balanza en un sentido, otro acontecimiento casual termina por restablecer el equilibrio. La realidad sigue una vía media entre el orden perfecto y el desorden total: estos dos, el orden y el desorden totales, no son sino abstracciones.

Si el caos es nuestro enemigo, no lo dejaremos vencer. Hay dos maneras de dominar al caos: una es descubrir su secreto —sus leyes— y la otra es transmutarlo en orden. Puesto que toda acción eficaz involucra algún conocimiento, todo se reduce a conocer las maneras de ser del caos, o sea, las leyes del azar. Una vez que suponemos que el azar no es informe ni ilegal, podemos disponernos a encontrar sus leyes. Y una vez que formamos este propósito podemos abrigar la esperanza de lograr éxito. Esto es, en efecto, lo que ocurrió: hace cosa de un siglo unos pocos científicos se propusieron descubrir las pautas del azar y lo lograron. Hoy día toda ciencia dedica buena parte de sus esfuerzos a descubrir leyes de sucesos y procesos aleatorios: toda ciencia es, al menos en parte, estadística. Pero antes de abordar el problema de las leyes estadísticas debemos analizar las nociones de orden, azar y posibilidad.

1.2. *Orden y desorden*

Una cosa puede exhibir orden en algún respecto y desorden en otro. Un caso extremo de comportamiento desordenado es el que exhibe un cuerpo gaseoso: en este caso la distribución de las moléculas en el espacio es desor-

denada, y lo mismo vale para sus velocidades y trayectorias. Cada molécula sigue su propio camino sin ser grandemente influida por lo que hacen las demás moléculas. Los gases son, pues, caóticos al nivel molecular. Sin embargo, este desorden al nivel microfísico es compatible con una conducta sorprendentemente ordenada del gas como un todo. En efecto, un gas librado a sí mismo en un recinto rígido tendrá una presión y una temperatura constantes. Más aún, se puede demostrar que el caos molecular es, precisamente, una condición necesaria de semejante conducta macrofísica. En efecto, imagínese que por algún mecanismo todas las moléculas contenidas en un recipiente se reúnan sobre una de sus paredes; entonces la presión sobre las paredes restantes decrecería, y un momento después la situación se invertiría. En suma, el azar en un nivel es necesario para que haya orden de cierto tipo (orden estadístico) en otro nivel.

En el otro extremo del espectro de grados de orden encontramos esas estructuras aparentemente perfectas que llamamos cristales. El cristal perfecto parece un dibujo geométrico. Los átomos parecen cuidadosamente dispuestos en capas, y éstas cuidadosamente apiladas como si constituyeran sandwiches. Pero si se observa con detenimiento se encontrará, en casi todo cristal real, defectos de varias clases: errores en la disposición de las capas, dislocaciones de diversos tipos, e impurezas químicas. Si no fuera por tales defectos, muchos cristales no conducirían la electricidad y no tendríamos la maravillosa variedad de piedras preciosas, ya que en todos estos casos pequeñísimas impurezas son responsables de efectos notables. Todo esto, hoy bien sabido, se desconocía antes de la última guerra. Hace tan sólo dos décadas que se evaporaron nuestras ilusiones acerca de la perfección y sencillez de los cristales. Y no hace más de diez años que se descubrieron cristales aparentemente perfectos: los pequeñísimos bigotes que crecen en las caras de todos los cristales. Estos pelos feos que se distribuyen desordenadamente y destruyen la simetría de conjunto del cristal son sus únicas componentes perfectas. (Al menos así se cree actualmente.)

Considérese el estado líquido, intermedio entre el gaseoso y el sólido. Si se pone atención en una molécula y sus vecinas inmediatas se hallará un orden casi perfecto: cada molécula está rodeada de otras moléculas ubicadas en los vértices de un hexágono u otro polígono. Pero si se investiga la cosa con mayor detenimiento se verá, o mejor dicho se inferirá, que las moléculas no equidistan del centro. Esta irregularidad en el espaciamento hace imposible que exista un orden de conjunto en un líquido. Por esto se dice que, en tanto que los sólidos exhiben tanto orden local [*short-range*] como global [*long-range*], los líquidos sólo poseen orden local y los gases ni uno ni otro al nivel molecular. Pero incluso el orden local es imperfecto en un líquido y puede existir en un solo respecto, a saber en lo que concierne a la configuración espacial, y no en el aspecto dinámico. Por ejemplo, las mo-

lécúlas de parafina están dispuestas en un orden cristalino pero están orientadas al azar. Esto basta para impedir el ingreso de la parafina en el paraíso de los cristales. En efecto, la parafina se ubica en la clase de los cuerpos en estado gaseoso-cristalino, en virtud de la peculiar combinación de orden geométrico con azar dinámico.

Hay, entonces, muchas clases de orden. La probabilidad de encontrar un trozo de materia que exhiba orden perfecto en todo respecto es nula. Aun la eliminación del movimiento casual llamado "calor" no elimina del todo al azar. Es cierto que, a bajas temperaturas, el orden prevalece sobre el desorden: los átomos y moléculas cesan gradualmente de vagar al azar, y terminan por dejar de oscilar en torno a posiciones de equilibrio. Pero algunas porciones de materia están en contacto con partes más calientes o están sometidas al bombardeo al azar de quanta de luz o de rayos cósmicos. Ni siquiera un trozo de materia a la temperatura del cero absoluto está libre de perturbaciones al azar.

Así como hay muchas *clases* de orden (geométrico, dinámico, etc.), hay también diversos *grados* de orden. Considérese, por ejemplo, las moléculas pesadas que constituyen la materia viva, o las muchas sustancias sintéticas inventadas por el hombre. Algunas de estas moléculas son cadenas de átomos, otras árboles más o menos retorcidos, y finalmente otras exhiben ramificaciones casi al azar. Hay muchos grados de orden y la misma sustancia puede adoptar un orden determinado en ciertas circunstancias, cambiándolo por otro en circunstancias diferentes. Por ejemplo, si se calienta un trozo de hierro, llega un punto en que se transforma en un líquido. A otra temperatura pierde sus propiedades magnéticas. En ambos casos la transición es discontinua e involucra la pérdida de orden en algún respecto. En otros casos no hay pérdida de orden sino cambio de tipo de orden. Por ejemplo, el estaño puede existir en dos estructuras cristalinas totalmente distintas, según la temperatura a que se halle.

En suma, el mundo exhibe muchas clases de orden y muchos grados de orden, de modo que si encontramos que algo es caótico en algún respecto, no debemos desesperar: lo más probable es que sea ordenado en algún otro respecto. Más aún, el orden se oculta a los sentidos con harta frecuencia, de manera que no podemos tener la seguridad de que algo es realmente desordenado o ajeno a toda pauta a menos que hagamos una investigación detallada. Por ejemplo, hasta hace una treintena de años los biólogos consideraban a la célula —excepto el núcleo— como modelo de cosa amorfa y desordenada. Gracias al microscopio electrónico se encontraron pautas morfológicas. Por ejemplo, ahora se sabe que un cloroplasto es una pila de capas moleculares ordenadas: un sandwich de clorofila, lípidos y proteínas, y no una pelotita amorfa. Poco importa si las apariencias no exhiben pautas. La tarea de la investigación científica es ir más allá de la apariencia,

descubrir pautas tras el caos, así como también desviaciones casuales de pautas ideales.

1.3. Degradación y auto-organización

Aunque el orden y el desorden van acompañados, parecería que el desorden termina por predominar. Déjese a un niño de corta edad en una habitación repleta de objetos ordenados y se verá que le bastará poco tiempo para destruir el orden: la mayoría de las cosas estarán dispersas caóticamente sobre el piso. Se podrá restaurar el orden pero a costa de trabajo. En la naturaleza sucede otro tanto: las cosas decaen a estados de mayor desorden. Estos estados son más probables que los estados de orden, que a su vez son menos numerosos. Cualquiera sea el orden inicial que se escoja para los objetos de una habitación, el niño se las arreglará para reducirlos a un caos uniforme. A menos que se aporte energía del exterior, no se podrá restaurar el orden original, sea en la sala, sea en la naturaleza.

Sin embargo, no todos los procesos apuntan a un desorden creciente. También los hay que conducen a una mayor estructuración. Sólo que, al parecer, no suceden al nivel de las cosas ordinarias: tales procesos de ordenamiento espontáneo suceden, sea al nivel atómico, sea al nivel cósmico. Así, por ejemplo, las partículas nucleares tienden a agruparse en núcleos, los que a su vez atraen a cortejos íntegros de electrones: así se forman los átomos. A su vez, los átomos tienden a agruparse en moléculas, y éstas se reúnen formando anillos, cadenas, árboles, etc. Análogamente, las partículas de polvo cósmico tienden a aglomerarse en nubes que se calientan progresivamente. Eventualmente surgen torbellinos en estas nubes, y emerge una galaxia espiral. Todos estos son procesos de *auto-organización* [*self-assembly*], procesos de agregación espontánea de trozos de materia, en el curso de los cuales aparecen formas de organización de complejidad creciente. Estos procesos de auto-organización son el resultado de ciertas fuerzas, tales como las nucleares (de corto alcance) y las eléctricas y gravitatorias (de largo alcance).

Solía creerse que la emergencia de orden a partir del caos era improbable, ya que casi todas las fuerzas son destructivas, y que la probabilidad de que se produzca una molécula compleja por el choque casual de átomos es despreciablemente pequeña. Se creía, por consiguiente, que no hay orden sin designio, así como no hay mansión sin arquitecto. Sólo unos pocos pensadores audaces, tales como Demócrito y Descartes, pensaron diversamente y propusieron ingeniosos esquemas de auto-organización. Pero estos esquemas eran especulativos. Tan sólo durante las últimas dos décadas se ha ido formando una concepción comprobable, y en parte ya comprobada, de los procesos de auto-organización de la materia. Ya se habla de estas investigaciones como de un nuevo y floreciente campo de la ciencia. Hoy adverti-

mos que el argumento del diseño o plan era falaz: que las fuerzas físicas pueden explicar la auto-organización de la materia, incluso de gigantescas moléculas orgánicas, así como la gravedad y la convección pueden explicar la formación de galaxias a partir de trocitos de materia inicialmente distribuidos al azar. Por ejemplo, si se mezclan los reactivos adecuados y se los sujeta a condiciones físicas similares a las que puedan haber imperado en nuestro planeta hace 5 000 millones de años, se obtienen moléculas orgánicas a partir de compuestos inorgánicos. Más aún, los biólogos parecen estar en vísperas de sintetizar unidades de materia viva en el laboratorio. La creencia pesimista en la degradación universal del cosmos está siendo refutada o, más precisamente, está siendo arrinconada a uno de los niveles de organización. Antes de que algo pueda comenzar a desintegrarse debe haberse formado, y semejante emergencia puede hoy explicarse como un proceso natural espontáneo, aunque legal. Orden y desorden se generan el uno al otro. Y ninguno de ellos es ilegal: incluso las desviaciones respecto del orden ideal se ajustan a pautas, si no individuales al menos colectivas (estadísticas).

Esto vale no sólo para moléculas y galaxias sino también para organismos. Ciertamente, todo organismo se ajusta a una red de leyes biológicas, pero estas leyes no excluyen las variaciones casuales sino que las abarcan. Tómese, por ejemplo, las mutaciones casuales, o errores en la composición de las macromoléculas llamadas genes. Si no existieran tales mutaciones o variaciones individuales, el ambiente no ejecutaría su función selectiva. Y en ausencia de selección no habría evolución: no surgirían especies nuevas ni se extinguirían individuos y especies mal adaptados. Las mutaciones casuales son por esto una condición necesaria de la evolución y, en particular, del progreso biológico. Así como un cristal sin defectos es aburrido, una población de organismos genéticamente invariables, si existiera, permanecería estancada y por lo tanto impotente en medio de un medio cambiante. Lo mismo vale para la sociedad: una sociedad perfecta, sin defectos o al menos totalmente ajustada a un plan fijo, sería una sociedad estancada condenada a la extinción. Si algunos entre nosotros aspiran a alcanzar órdenes sociales superiores a los actuales, es porque encuentran que éstos son insatisfactorios. En algunos casos la novedad, en particular la novedad superior, surge por casualidad; en otros surge por diseño humano.

1.4. *Azar y ley*

Echemos un vistazo al juego de azar y orden en el dominio biológico. Según las ideas dominantes, los rasgos de todo organismo están determinados por los genes de sus antecesores inmediatos (los progenitores en el caso de la reproducción sexual). Estos genes son macromoléculas que se combinan al azar, o casi, cuando se forma un nuevo ser. Por lo tanto, el nacer se pa-

rece más a la extracción de un billete de lotería que al moldeado de un trozo de arcilla. Las leyes de la herencia son, esencialmente, las leyes del barajado al azar de una colección de genes; el juego de la vida no comienza sino después de semejante barajado al azar [*random shuffling*]. Elimínese este elemento de azar y se producirá una chata uniformidad. Es lo que ocurre con la partenogénesis. Y lo que sucede con las poblaciones aisladas; la endogamia termina por crear un fondo genético estrecho: los individuos tienden a parecerse cada vez más entre sí e incluso comparten rasgos mutantes. El resultado es que ninguno de ellos está mejor preparado que los otros para enfrentar los inevitables cambios fortuitos del medio, con lo cual disminuyen las *chances* de supervivencia del grupo. Cuanto mayor es la variedad tanto mayor es la probabilidad de supervivencia de la especie.

La cantidad de variedad está sujeta a ley. Tómese, por ejemplo, una persona de cabello oscuro descendiente de una larga línea de individuos de cabello oscuro, que se casa con un individuo de cabello rubio descendiente, igualmente, de una larga línea de individuos similares en este respecto. Puesto que el cabello oscuro es dominante y el claro recesivo, lo más probable es que la descendencia tenga cabello oscuro. Pero cada hijo poseerá una mezcla de genes: por cada gen de cabello oscuro tendrá uno de cabello claro. Por consiguiente, su propia progenie tendrá oportunidad de contar con individuos rubios. Si estos individuos se unieran, las probabilidades serían éstas: $\frac{3}{4}$ de cabello oscuro y $\frac{1}{4}$ de cabello claro. Pero si cualquiera de ellos se casara con un individuo de cabello claro, las probabilidades se igualarían. Con otros rasgos sucedería otro tanto. De esta manera cada rasgo obtiene una oportunidad de difundirse a través de toda una población en el curso del tiempo. Erijanse barreras, sea geográficas, sea legales, y la variedad quedará confinada. Por consiguiente disminuirán las *chances* de supervivencia de la especie. Los abogados de la pureza racial abogan, pues, por la extinción de la especie.

¿Cómo se ponen a prueba las hipótesis involucradas en estos cálculos genéticos? Observando las características de las nuevas generaciones en poblaciones muy numerosas. Si las hipótesis son verdaderas, entonces —cualesquiera sean las variaciones individuales— la composición genética de la población será vecina a las probabilidades calculadas; esto es, las frecuencias observadas serán próximas a las probabilidades teóricas. Pero si la composición observada difiere netamente de la predicha, concluimos que por lo menos una de las hipótesis es falsa; por ejemplo, que uno de los rasgos no es dominante, o bien que no es independiente de otros rasgos. En todo caso, en la genética, como en las demás ciencias, se empieza por hacer ciertas observaciones —por ejemplo que los niños tienden a parecerse a sus padres— y se formulan conjeturas para explicar tales regularidades observadas, conjeturas que se ponen a prueba acumulando nuevos datos. Desde el punto

de vista metodológico importa poco que las conjeturas conciernan a leyes probabilistas o no: en todos los casos la sucesión es ésta: observación — problema — hipótesis — predicción — nueva observación para poner a prueba la hipótesis. En particular, la lógica que gobierna las inferencias que se realizan en procesos de este tipo es la misma que la que interviene cuando se juzga el mérito de leyes no probabilistas: en ningún caso se emplea la llamada lógica inductiva, que ni es lógica propiamente dicha ni existe salvo en forma embrionaria.

La reproducción de individuos similares, sea moléculas o seres humanos, es fuente de azar: nunca se sabe con certeza qué aspecto tendrá la progeñie, a menos que descienda de individuos casi idénticos. Lo que no es sorprendente, ya que la propia unión de los progenitores es casi siempre casual. En general, el cruce de dos líneas de desarrollo inicialmente independientes es causa de casualidades, como lo advirtió Crisipo hace dos milenios. Si una persona da con una veta de uranio mientras hace alpinismo por placer, encuentra su fortuna, no gracias a trabajos arduos y meticulosamente planeados sino por casualidad. Análogamente, los choques de automóviles y de moléculas son casuales. Pero todo acontecimiento tiene una probabilidad. Por ejemplo, la probabilidad de que un individuo sedentario dé con una mina de uranio mientras escala una montaña es nula; y la probabilidad de choques moleculares aumenta con la presión y la temperatura, y no es la misma para choques binarios que para choques ternarios o cuaternarios. En todo caso, todo acontecimiento casual tiene su probabilidad, y el encuentro de dos líneas de desarrollo inicialmente independientes es un acontecimiento casual.

Otra fuente común de casualidades es la inestabilidad. Los políticos saben que una situación política inestable puede desembocar en cualquier cosa y, dado que la mayoría de las situaciones están fuera de su control, se esforzarán por retornar a la estabilidad aun al precio de compromisos. En física, una posición inestable y un movimiento inestable pueden dar lugar al azar. Por ejemplo, una pequeña piedra ubicada en la cumbre de una montaña terminará por caer, sea empujada por una ráfaga de lluvia o movida por un pequeño sismo, y a su vez producirá cierto caos a lo largo de su caída, a semejanza del caos que acompaña a la caída de un presidente. La trayectoria de la piedra será tan compleja, y sus efectos tantos y tan variados, que el proceso íntegro escapará a la predicción detallada. En cambio, si se considera todo un conjunto de procesos similares —por ejemplo, la erosión gradual del pico de una montaña joven— emergerán ciertas regularidades colectivas. Por ejemplo, se puede predecir los cambios de perfil de una montaña como efecto de la erosión atmosférica. Al par que el acontecimiento individual es a menudo impredecible, las colecciones numerosas de acontecimientos casuales similares pueden domarse, ya que las diferencias indivi-

duales tienden a compensarse, formándose promedios y tendencias más o menos estables.

1.5. *Posibilidad*

El pedrusco situado en la punta de un cerro caerá necesariamente alguna vez, pero es sólo posible que caiga durante la próxima estación de las lluvias, y no es sino posible que llegue íntegro al fondo del valle. Análogamente, una moneda tocará necesariamente el suelo si se la suelta, pero es sólo posible que caiga en posición de "cara". El mismo proceso exhibe necesidad y posibilidad, aunque no en el mismo respecto. Y ambos rasgos están relacionados, pues la posibilidad de obtener una "cara" o una "cruz" depende de la necesaria caída. Más aún, es posible convertir en necesario el resultado final, revoleando la moneda con cuidado y apuntando a un almohadón mullido. En este caso podemos controlar el azar al punto de suprimirlo totalmente, eliminando así toda incerteza concerniente al resultado. Recíprocamente, se puede destruir el orden o casualizar en ciertos aspectos. Pero esto es más difícil de lograr de lo que se cree. Por ejemplo, es bastante difícil casualizar un mazo de naipes barajándolos. Análogamente, no es fácil formar una tabla de números al azar; tanto es así, que todas las tablas de números al azar encierran ciertas correlaciones ocultas a primera vista, al punto de que se los llama ahora "números seudocasuales".

En todo caso, ni el orden ni el azar tienen nada de fatal. Ambos son extremos de una rica gama de grados de orden que podemos recorrer de una punta a la otra si logramos descubrir los mecanismos de la transición de un grado al otro. Esto presupone, desde luego, que existen mecanismos aleatorios y mecanismos ordenadores, y que unos y otros pueden conocerse. En otras palabras, hacemos la hipótesis de que la posibilidad y la necesidad no son irracionales o incognoscibles: que pueden ser analizadas y en consecuencia dominadas al menos en algunos casos.

La posibilidad no se confina al dominio de los acontecimientos casuales. Antes que algo haya sucedido debe haber sido posible. Más aún, muchas posibilidades nunca se actualizan. A Evariste Galois le fue imposible escribir en detalle sus ideas revolucionarias sobre la teoría de los grupos, porque fue muerto en un duelo a los 21 años de edad. Para que la posibilidad se actualice hay que darle una oportunidad, por así decirlo. Ésta es, por supuesto, una manera metafórica de decir que para que algo suceda deben estar presentes todas las condiciones. Cuando decimos que un hecho es posible queremos significar que ciertas condiciones se han satisfecho pero otras condiciones aún no han sido llenadas. El acontecimiento sucederá cuando se satisfagan todas las condiciones necesarias y suficientes. Por ejemplo, una moneda alcanzará el suelo tan sólo si se la suelta en medio de un campo gra-

vitatorio homogéneo y en ausencia de viento huracanado. Si no se la suelta, el que llegue al suelo es tan sólo posible. Y en cuanto el acontecimiento sucede deja de ser posible: la actualidad, como diría Aristóteles, es potencialidad consumada.

Todo cuanto ocurre ha sido posible. La recíproca no es cierta: no es verdad que todo lo que es posible terminará por ocurrir. En efecto, muchas posibilidades no se actualizan jamás. Por ejemplo, rara vez hacemos uso de las oportunidades que se nos presentan. Si viviéramos eternamente acaso no perderíamos tantas oportunidades, porque aprenderíamos sin cesar. Pero en tal caso quizá no sentiríamos motivo para sacar provecho de nuestras posibilidades: seríamos entonces presa fácil de toda circunstancia adversa y nos extinguiríamos. Paradojas aparte, la posibilidad es la raíz de la actualidad, sea el hecho real casual o no.

1.6. Posibilidad y ley

Lo que es posible y lo que no lo es queda determinado por las leyes de la naturaleza o de la sociedad, según el caso. (Ésta es una manera metafórica de decir que los hechos posibles están relacionados nomológicamente con los hechos acaecidos.) En otras palabras, algo es *posible* si existe un conjunto de leyes tales que el acontecimiento en cuestión es compatible con tales leyes. Y algo es imposible tan sólo si no es posible. Por ejemplo, es posible enviar un hombre a Venus, pues ninguna ley de la naturaleza se opone a ello. En cambio, no es posible enviarlo al pasado, porque esto contradiría las leyes naturales. Por la misma razón se pueden recordar experiencias pero no se puede espiar el futuro.

El concepto de posibilidad, aunque importante, puede reducirse entonces al de legalidad: algo es posible si y sólo es legal. (No podemos entrar aquí en el problema lógico que plantea la existencia de leyes probabilistas.) Esta concepción de la posibilidad le permite al científico descartar un cúmulo de acontecimientos concebibles pero incompatibles con las leyes conocidas, sin tener que esperar a que la experiencia le muestre que no los puede producir. Tómese, por ejemplo, el encendido de un cigarrillo. La ley de conservación de la energía posibilita el encendido espontáneo del cigarrillo, por concentración de la energía térmica del aire circundante en la punta. Pero esto es imposible, o más estrictamente altamente improbable, de acuerdo con otra ley de la física, a saber la segunda ley de la termodinámica, de acuerdo con la cual el calor tiende a distribuirse homogéneamente. Por esto, en lugar de esperar a que ocurra lo imposible (o lo extremadamente improbable), el fumador emplea cerillas. Algo similar ocurre con la magia, la telepatía, la clarividencia, la visión del futuro, y cosas parecidas: no hacen falta nuevos

experimentos para descartarlas como imposibles, porque son incompatibles con leyes científicas bien corroboradas.

Esta manera moderna de concebir lo posible, como arraigado en lo legal, es muy diferente de las concepciones antiguas, en particular la mágica y la aristotélica. Según los defensores de la magia, nada le resultaría imposible a quien poseyera los poderes adecuados: el mago puede violar las leyes de la naturaleza y a su vez sus propios poderes no obedecen ley natural alguna. Para bien o para mal, la magia es ineficaz: si uno desea que las cosas se hagan tiene que hacerlas a la luz del conocimiento de las leyes naturales o sociales, según el caso. (Además, está el argumento de que la noción de omnipotencia lleva a contradicción, ya que un ser omnipotente debe poder producir situaciones frente a las cuales él mismo sea impotente. Lo mismo se aplica a la omnisciencia.)

En cuanto a Aristóteles, éste creía que explicaba un hecho cuando decía que era la actualización de posibilidades latentes o potencias. Para nosotros los modernos, ésta no cuenta como explicación: creemos que tan sólo un conocimiento detallado de las leyes y circunstancias puede producir una explicación y por consiguiente una comprensión correcta del hecho concreto y aun de su posibilidad. Más aún, estamos en situación de sustentar esta creencia en el poder que nos da nuestro magro conocimiento de las leyes objetivas. En efecto, un conocimiento de leyes y circunstancias nos permite predecir acontecimientos, esto es, decir con anticipación qué sucesos habrán de ocurrir, sea posiblemente, sea necesariamente. En suma, la posibilidad ha dejado de ser irreducible para convertirse en derivada. Son las leyes las que nos dicen qué puede suceder y qué no puede suceder.

El científico, que desea averiguar qué es posible y qué no lo es, hace la hipótesis filosófica de que hay leyes. (Sin embargo le asombraría que le dijeran que esto es hacer filosofía.) En un mundo sin leyes cualquier cosa podría ocurrir y por consiguiente nada sería predecible. El hielo se fundiría unas veces a una temperatura, otras a una temperatura diferente. Además, apenas habría hielo, excepto durante un breve momento, ya que el hielo está caracterizado por una configuración cristalina determinada, que a su vez se funda sobre leyes de fuerzas. Análogamente, los juegos de azar no exhibirían pauta alguna. Las monedas no caerían cada vez que se las revolcara: algunas veces se escaparían, otras desaparecerían, y otras se metamorfosearían en jirafas o en sueños. Puesto que esto no ocurre sino en pesadillas, inferimos que hay leyes. Más aún, planeamos todo acto racional a la luz del conocimiento de tales leyes, aunque sea superficial.

Cuando apuntamos a un blanco, sea literal o metafórico, algunas veces acertamos y otras no. Lo mismo le sucede al resto de la naturaleza. El mundo está lleno de cosas defectuosas: de átomos incompletos (ionizados), de cristales con fallas, de estados inestables, de mutantes, y de comunidades

aberrantes. A veces las desviaciones respecto de la norma son tan grandes que llevan a la destrucción de la cosa, esto es, a la aparición de un tipo de orden diferente. Otras veces las desviaciones se adaptan mejor a un medio cambiante que los individuos (moléculas, cristales, personas, sociedades) normales —esto es, exitosos en circunstancias ya desaparecidas— y por lo tanto aquéllas sobreviven mejor. Considerado individualmente un éxito o un fallo parecería no ajustarse a ninguna pauta. Pero si se los toma en conjunto, como población estadística, no dejarán de exhibir regularidades. Esto nos estimula a suponer que todo suceso casual, toda desviación casual a partir de la norma, tiene una determinada probabilidad aun cuando no se la pueda predecir con exactitud. Suponemos también que la frecuencia a largo alcance de tales acontecimientos casuales es estable (fluctúa poco) y vecina a su probabilidad. En suma, suponemos que incluso el comportamiento desordenado es legal: que satisface leyes de cierto tipo, a saber, leyes estocásticas. Pero los temas de la probabilidad y de las leyes estocásticas merecen capítulo aparte.

2. PROBABILIDAD Y LEYES ESTOCÁSTICAS

2.1. *Probabilidad*

El concepto de posibilidad es importante pero vago, tan importante y tan vago como los conceptos “grande” y “bueno”. Es necesario precisarlo, porque no basta saber que un hecho es posible: deseamos saber cuán posible es, esto es, cuál es su grado de posibilidad. Por ejemplo, podemos desear averiguar cuál es la posibilidad de tener cinco hijos varones seguidos, o de gozar de buen tiempo el próximo domingo. Para esto es menester remplazar la noción tosca de posibilidad por la precisa de probabilidad, y el discurso impreciso sobre posibilidades por un cálculo de probabilidades.

La disciplina que elucida el concepto de probabilidad y de reglas para calcular probabilidades es, desde luego, el cálculo de probabilidades. Esta teoría es una rama de la matemática pura. Como tal no le concierne la naturaleza de los acontecimientos que consideramos posibles, ni le interesa la naturaleza de los procesos que consideramos aleatorios. Así, por ejemplo, para el cálculo de probabilidades el acontecimiento compuesto consistente en obtener dos “caras” con dos monedas es igual al suceso consistente en tener dos hijas sucesivamente. En cada uno de estos dos casos la probabilidad del acontecimiento simple, sea obtener una “cara”, sea procrear una niña, es un medio, de modo que la probabilidad del acontecimiento compuesto por dos acontecimientos simples e iguales vale $1/4$. El cálculo de probabilidades está tan desvinculado de cuestiones de hecho como el resto de la matemática pura. Precisamente por esta razón, por esta su pureza, es una

herramienta tan versátil y por consiguiente tan útil. Pues, si la teoría de las probabilidades se ocupara de la naturaleza de las situaciones, sería una teoría estrecha y no la hallaríamos por doquier en la ciencia y en la tecnología, desde la física hasta la psicología, desde la ingeniería hasta la medicina.

Ahora bien, toda expresión matemática puede leerse o interpretarse de muchas maneras. En particular, a las fórmulas probabilistas se les puede asignar diversas interpretaciones. Algunas de éstas son correctas, las demás no. (Una interpretación correcta de un cálculo formal se llama un *modelo* de éste.) En la literatura científica suelen encontrarse cinco interpretaciones diferentes, y muchos autores se las ingenian para confundirlas en un mismo contexto. Éstas son: la interpretación de la probabilidad como propensión y como medida del azar; la interpretación estadística y la interpretación de la probabilidad como verosimilitud; y la interpretación de la probabilidad como grado de creencia o probabilidad subjetiva. Esta proliferación confunde si no se distinguen claramente las diversas interpretaciones, lo que es muy fácil.

Consideremos en primer lugar la interpretación de la probabilidad como propensión o tendencia, propuesta por Karl Popper. De acuerdo con esta interpretación, el valor numérico de una probabilidad es una medida de la intensidad de la tendencia o propensión de un suceso a ocurrir. En otras palabras, según esto la probabilidad cuantifica la posibilidad o potencia en cuanto característica objetiva de las cosas. Conforme a la segunda interpretación, la probabilidad es el peso de un acontecimiento perteneciente a una colección de sucesos casuales o a un proceso aleatorio. Sea que se la interprete de una u otra manera, como propensión o como peso de un hecho casual, la probabilidad de un acontecimiento es una propiedad objetiva del mismo: es inherente a las cosas, no a nuestra manera de verlas. La diferencia entre ambas interpretaciones es que la primera de ellas es más amplia, puesto que no exige que los acontecimientos sean casuales, en tanto que la interpretación estocástica vale solamente para hechos casuales y por consiguiente requiere reglas que nos permitan decidir si un conjunto dado de hechos es aleatorio. Pero en ambas interpretaciones la probabilidad de la transición de un sistema de un estado a otro (por ejemplo, la probabilidad de una desintegración radiactiva, o de una respuesta de un organismo) es tan objetiva como la velocidad de la transición: no está para nada relacionada con la incertidumbre o con la firmeza de nuestras creencias. No sucede lo mismo con las otras tres interpretaciones mencionadas.

Según la tercera interpretación, la estadística, las probabilidades son frecuencias relativas de acontecimientos observados, o sea, son pesos de muestras estadísticas. La cuarta interpretación es aquella según la cual la probabilidad mide la verosimilitud de una hipótesis. En este caso se hablará, por ejemplo, de la probabilidad de determinada hipótesis en el supuesto de que otra

conjetura sea cierta. Finalmente, en la interpretación subjetivista de la probabilidad, se trata del grado de firmeza que asignamos a una creencia, independientemente de los hechos. En cualquiera de estos tres casos, sea que se trate de una frecuencia relativa observada, sea de una verosimilitud, o de un grado de creencia, interviene un sujeto: en el caso estadístico, el sujeto extrae una muestra de una población, y en los otros dos casos el sujeto juzga o pesa una idea. Esto contrasta con las interpretaciones objetivas que consideramos previamente, según las cuales la probabilidad es una propiedad objetiva de las cosas.

Debemos cuidar de no mezclar estas cinco interpretaciones, pues de lo contrario podemos terminar por asignarle a la naturaleza inanimada estados mentales, tales como la certidumbre, o bien asignarle a nuestro juicio la propiedad de ser aleatorio. Por ejemplo, supongamos que hayamos calculado la probabilidad de cierta transición atómica T en una determinada circunstancia C . La transición puede ser, por ejemplo, la excitación de un átomo irradiado con luz. Puesto que éste es un hecho físico, es preciso formular el resultado del cálculo teórico en un enunciado estrictamente físico, por ejemplo: "La probabilidad de la transición T en la circunstancia C es igual al número P ." Esto significará que, en las circunstancias especificadas, los átomos de que se trata tienen una tendencia o propensión P a efectuar la transición T . El número P no debe confundirse con la frecuencia relativa de dicha transición, pues la probabilidad fue calculada, no medida, y puede diferir del resultado medido. Por ejemplo, puede darse que, debido a la imperfección de nuestros medios de observación, no detectemos ninguna señal de dicha transición, de modo que concluyamos que su frecuencia relativa es nula; o bien, puede ocurrir que la frecuencia observada sea nula, y esto sea verdadero, pero en cambio la teoría empleada para calcular la probabilidad sea falsa. Si fuésemos a interpretar todas las probabilidades como frecuencias, no podríamos contrastar las teorías con los datos empíricos a fin de poner a prueba tanto las teorías como los datos. Dicho de otra manera: la interpretación de probabilidades como frecuencias es incorrecta; lo que sí es correcto es la *estimación* o evaluación aproximada de probabilidades mediante frecuencias.

Tampoco debiera interpretarse la frase enunciada más arriba, acerca de la probabilidad de cierta transición, como nuestro grado de certeza acerca de la frase misma, o acerca del acontecimiento que ésta describe. La credibilidad que podamos asignar a nuestros cálculos nada tiene que ver con la probabilidad física que mide el grado de una posibilidad o intensidad de una tendencia. Cualquiera que sea el valor de una probabilidad física, la credibilidad podrá variar entre cero y uno, según las *performances* pasadas de la teoría. Por ejemplo, si sabemos que la teoría es redondamente falsa, deberemos asignar credibilidad nula a sus predicciones aun cuando éstas consistan

en enunciados que asignan una elevada probabilidad a cierto acontecimiento. Recíprocamente, si la teoría es verdadera o casi verdadera, les asignaremos una elevada credibilidad a sus predicciones, independientemente de los valores que tomen las probabilidades físicas que aparecen en ella. En resumen, no debemos confundir la probabilidad de un hecho, que es un rasgo objetivo del mismo, con la probabilidad de una proposición, que puede no ser un asunto puramente objetivo.

Pero en cualquiera de los cinco casos la probabilidad es una cierta medida de posibilidades de algún tipo, y en cualquiera de ellos el cálculo de probabilidades nos ayudará a analizar las posibilidades. Más aún, se puede definir el concepto de posibilidad en términos del concepto de probabilidad, a saber de esta manera: x es posible si y sólo si la probabilidad de x es mayor que cero. En cambio debiéramos abstenernos de hablar de probabilidades a menos que éstas se combinen de la manera prescrita por el cálculo de probabilidades. Y a fin de averiguar si se combinan así es preciso asignarles valores numéricos precisos. Pero ésta es tarea del cálculo aplicado de probabilidades, no de la teoría matemática pura.

2.2. *Leyes estocásticas*

A fin de aplicar el cálculo de probabilidades debemos agregarle tres ingredientes que la matemática no supe. Uno es una interpretación determinada, tal como alguna de las interpretaciones mencionadas más arriba. Un segundo ingrediente es un modelo del acontecimiento o proceso en cuestión, por ejemplo el modelo de urna sugerido por la lotería, o el modelo del andar del borracho. La tercera componente que hay que añadir al formalismo matemático para hacerlo aplicable al estudio de hechos reales es el aparato de la estadística matemática, que provee de medios para calcular propiedades estadísticas, tales como promedios, y para evaluar hipótesis estadísticas.

Considérese, por ejemplo, una enfermedad contagiosa. La propagación de una enfermedad de este tipo en una comunidad es, en lo esencial, un proceso aleatorio, al menos si los individuos no están estrictamente aislados entre sí. Un posible modelo de este proceso es el de una urna que contiene N bolillas negras y R bolillas rojas; las negras simbolizan los enfermos y las rojas los sanos. Se extrae una bolilla al azar, esto es, habiendo agitado previamente la urna y absteniéndonos de escrutar su interior. Se observa el color de la bolilla extraída y se la reemplaza en la urna junto con otras E bolillas del mismo color. Después de la primera extracción la urna contiene N más R más E bolillas. Por consiguiente, al hacerse una segunda extracción al azar, la probabilidad de obtener una bolilla del mismo color que la vez anterior habrá aumentado. Procediendo de esta manera llegará un momento en que la población total estará casi íntegramente curada o casi íntegramente infec-

tada. En este caso, el mecanismo aleatorio que subyace al proceso es bastante sencillo, tanto que no requiere otra teoría que el cálculo de probabilidades. Pero en muchos casos es preciso añadirle a éste teorías matemáticas íntegras si se quiere formular y elaborar las leyes de hechos casuales.

Hasta hace un siglo no se conocían leyes probabilistas o estocásticas. El cálculo de probabilidades se empleaba casi exclusivamente en relación con juegos de azar y con conjeturas inciertas. Luego nació la física estadística y poco después la biología estadística. Hoy día el cálculo de probabilidades se emplea por doquier en ciencia, no sólo como medida de la verosimilitud sino como medida de la posibilidad real. Por consiguiente las leyes de movimiento de Newton, e incluso las leyes de campo de Maxwell, han dejado de ser los paradigmas de la ley científica: hoy día consideramos a las leyes estadísticas, tales como las de la genética, como igualmente respetables. En suma, hoy día reconocemos que hay por lo menos dos tipos de ley científica: la probabilística o estocástica, y la no estocástica, a menudo llamada determinista o causal.

Una ley estocástica o probabilista no debe confundirse con una ley (axioma o teorema) del cálculo de probabilidades, rama ésta de la matemática pura. Tampoco es una mera regularidad estadística tal como las de la demografía o el mercado de valores. Una mera regularidad estadística puede dejar de estar en vigencia de la noche a la mañana: no es necesaria. Por ejemplo, si quisiéramos podríamos regular el número de incendios y el número de accidentes de tránsito. En cambio no podemos manipular con igual facilidad las leyes de la herencia o las leyes de distribución de las posiciones y velocidades de los átomos, que son leyes estocásticas.

Considérese, por ejemplo, la distribución de velocidades de las moléculas de un gas. Se encuentran casi todos los valores de la velocidad, y la velocidad de cada molécula es casi independiente de las velocidades de sus compañeras —casi pero no del todo, ya que las moléculas chocan entre sí y de este modo modifican recíprocamente sus velocidades. Estos choques regulan la velocidad media, ya que el paso de la molécula lerda es acelerado por un choque trasero, al par que el paso de la molécula impaciente es frenado por una colisión delantera. De resultas de estos choques, la mayoría de las moléculas adquiere una velocidad próxima a la velocidad media, así como la mayoría de los escolares son mediocres, porque los atrasados son apurados a alcanzar a los adelantados, y éstos son forzados a aminorar su paso para dar tiempo a los primeros. Éste es el origen de las curvas en forma de campana que rigen las velocidades moleculares, la *performance* escolar, y tantos otros fenómenos colectivos. La altura de la curva es la probabilidad de que cierta variable (representada como abscisa del gráfico) tome cierto valor; por ejemplo, la probabilidad de que la velocidad tenga cierto valor. Una variable que posee una distribución de probabilidades, esto es, tal que para cada uno

de sus valores existe una probabilidad dada, se llama una *variable aleatoria*. La velocidad de una molécula arbitraria de un cuerpo gaseoso, así como la *performance* escolar de un niño, son variables aleatorias. Éste es, naturalmente, el punto de vista del inspector de escuelas, no el del maestro, aún menos el de los padres: estos últimos pueden seguir en detalle la evolución de cada niño. El inspector, en cambio, puede vigilar y aun alterar las propiedades estadísticas de la población escolar: al introducir nuevas técnicas pedagógicas puede variar los promedios así como las dispersiones en torno a éstos. Análogamente, el físico puede alterar las propiedades estadísticas de una población de moléculas: calentando puede aumentar la velocidad media, y filtrando puede disminuir la variedad de valores de la velocidad. Lo que no puede hacer es violar la ley. Las leyes estadísticas son tan objetivas y firmes como las no estadísticas.

Es interesante observar que la ley de distribución de las velocidades no fue un resumen de observaciones sino resultado de suposiciones teóricas. Más aún, cuando Maxwell formuló esta ley, hace un siglo, no se efectuaban mediciones moleculares, entre otros motivos porque muy pocos creían en la realidad de las moléculas. Las suposiciones de las que Maxwell dedujo su ley son esencialmente las dos siguientes. Una es que cada molécula obedece las leyes de la mecánica clásica y, por lo tanto, posee una conducta perfectamente ordenada cuando se la considera en sí misma. La segunda hipótesis es que, inicialmente, las moléculas están distribuidas al azar con todas las velocidades posibles. No es de extrañar que esta suposición del azar inicial conduzca a un estado final de distribución al azar. Lo que sí maravilla es que esta curva acampanada pueda achatarse o comprimirse pero no convertirse en una curva de una clase diferente. Análogamente, las técnicas pedagógicas pueden modificar los valores de los parámetros de las curvas de *performance* escolar pero no pueden modificar su forma general. Y esto es, precisamente, lo que significa "legalidad", a saber, invariancia de pauta.

2.3. *Legalidad individual y colectiva*

En el caso del gas la conducta de cada molécula es causal o, mejor dicho, suele denominarse causal; la que es estocástica es la dinámica del conjunto. Más precisamente, la física clásica supone que la conducta individual de las moléculas es causal, ya que las teorías cuánticas no hacen esta suposición: según estas últimas, tanto el individuo como la colección se comportan estocásticamente, o sea, de acuerdo con leyes estocásticas. Por ejemplo, si encendemos una lámpara fluorescente, no todas las moléculas de la sustancia fluorescente se excitan al mismo tiempo; más bien, los tiempos de excitación se agrupan en torno a una curva de excitación. Igualmente, al apagar la lámpara: los tiempos de desactivación se agrupan a lo largo de una curva

probabilista. Toda molécula y toda colección de moléculas obedecen leyes estocásticas, pero cuando las colecciones son muy numerosas el elemento aleatorio es difícil de discernir, ya que las fluctuaciones estadísticas decrecen con el aumento de la población. En todo caso, debemos contar no sólo con leyes estocásticas concernientes al azar colectivo, sino también con leyes estocásticas concernientes al azar individual. En efecto, todas las leyes básicas de la física nuclear, atómica y molecular son leyes de azar individual. Conciernen a objetos individuales y sus propiedades o propensiones a conducirse de cierta manera, por ejemplo a ocupar determinados niveles de energía.

Un representante importante y célebre de estas leyes estocásticas individuales es el teorema de Heisenberg, también llamado principio de indeterminación o de incerteza. Este teorema concierne a microsistemas tales como electrones, átomos o moléculas, y dice que el producto de la dispersión media cuadrática de la posición de un microsistema por la dispersión media cuadrática de su velocidad es igual a una constante. Por consiguiente, si una de estas dispersiones crece, la otra decrece y recíprocamente. El teorema vale para cada sistema individual, sea que esté libre (no sometido a una acción exterior), sea que no lo esté (por ejemplo cuando está sometido a un proceso de medición). En efecto, para deducir el teorema no se hace ninguna suposición acerca de una colección de microsistemas ni acerca del medio en que se halla el sistema. El teorema vale, en particular, para un electrón libre solitario. Por extraño que pueda parecer a quien está habituado a la física clásica, la mecánica cuántica supone que cada microsistema individual posee una distribución de posición más bien que un valor preciso de la posición, y una distribución de la velocidad en lugar de un único valor de la velocidad. En otras palabras, la mecánica cuántica describe al microsistema individual mediante variables aleatorias, no mediante variables clásicas.

Esto contrasta con la imagen clásica de la bolilla maciza o del punto material, que posee tanto una posición como una velocidad determinadas en cada instante. Por esto algunos creen que las dispersiones que intervienen en el teorema de Heisenberg no son objetivas sino que significan nuestras incertidumbres subjetivas concernientes a la posición y velocidad reales pero desconocidas del electrón. De aquí el nombre "principio de incerteza" con que se conoce el teorema de Heisenberg. Pero la teoría se ocupa de microsistemas, no de nuestros estados mentales acerca de éstos: en efecto, en ningún momento se hace ninguna suposición acerca de nuestra constitución psíquica. Más vale enfrentar el hecho de que los microsistemas no se ajustan a la física clásica.

Otros creen que las dispersiones en cuestión tienen un significado objetivo pero conciernen la conducta totalmente indeterminada del microsistema: este objeto sería una partícula que se mueve al azar, como las partículas de polen o de humo. Pero esto requeriría la presencia de un medio causante

de tales fluctuaciones, y la mecánica cuántica vale incluso en ausencia de tal medio; además, las fluctuaciones de que habla esta teoría no son promedios temporales, que son los que aparecen en una teoría estocástica clásica tal como la del movimiento browniano. De modo que también ésta es una interpretación incorrecta de la mecánica cuántica. Y también ella presupone que los microsistemas son partículas puntiformes, esto es, entes clásicos. Pero la mecánica cuántica no hace tales supuestos y, más aún, fue introducida precisamente porque el modelo de la partícula fue hallado falso al nivel atómico. (Esto no excluye la posibilidad de construir una teoría clásica que abarque a la mecánica cuántica como caso especial: lo único que sostengo es que las interpretaciones mencionadas son incorrectas si se refieren a la mecánica cuántica.)

En mi opinión, la única interpretación permitida por el formalismo matemático de la mecánica cuántica es que los electrones y demás microsistemas están desprovistos de propiedades cinemáticas clásicas. Por este motivo los llamo *cuantones*, y llamo *quosición* un análogo cuántico de la posición, y *quomento* al análogo cuántico del momento lineal clásico.¹ Pero los microsistemas tienen la disposición o tendencia a adquirir una de estas dos propiedades cinemáticas clásicas. Por ejemplo, un electrón *puede* adquirir una posición determinada en el espacio a condición de que su velocidad se borre, y *puede* adquirir una velocidad precisa a condición de que se expanda hasta ocupar un cierto volumen del espacio. Las circunstancias, por ejemplo las interacciones con otros sistemas físicos, determinarán cuál de las dos distribuciones habrá de estrecharse y, por consiguiente, cuál de ellas habrá de ampliarse, de acuerdo con la ley de la constancia del producto de las dispersiones.

De esta rápida discusión del teorema de Heisenberg se derivan varias lecciones. Una de ellas es que los físicos están lejos de haber alcanzado un acuerdo unánime acerca del mismo. Otra es que muchos de los argumentos concernientes a la interpretación de una fórmula científica pueden aclararse si se analizan las suposiciones sobre las que se fundan dichas fórmulas. Una tercera lección es que no debiéramos esperar hallar las mismas leyes en todos los niveles, a menos que seamos reduccionistas convencidos. En particular, cuanto más profundamente descendamos, en la dirección de los constituyentes básicos de la materia, y cuanto más alto ascendamos a las formas más complejas de organización, tanto menos numerosas serán las analogías con la materia a escala ordinaria. Por consiguiente, debemos esperar que nuestras teorías fallen para niveles muy alejados de aquellos para los cuales fueron concebidas. Este fracaso es compensado por el éxito de las teorías capaces de explicar lo que sucede en los niveles descubiertos más recientemente.

Según nuestras teorías actuales, las probabilidades de los microaconte-

¹ M. Bunge, *Foundations of Physics*, Springer-Verlag, Nueva York, 1967, y "Quanta y filosofía", *Crítica*, 1, Nº 3, p. 41, 1967.

cimientos son irreductibles, esto es, no pueden explicarse como resultados estadísticos de un gran número de acontecimientos individualmente determinados. De lo contrario las leyes de la mecánica cuántica no se referirían a menudo a sistemas individuales, sino siempre a colecciones numerosas. ¿Es esto definitivo o puede concebirse que eventualmente se lograrán deducir las leyes estocásticas de la mecánica cuántica a partir de leyes no estocásticas, a la manera en que se puede deducir una ley de distribución de velocidades de partículas clásicas a partir de las leyes de la mecánica clásica? La mayoría de los físicos creen que tal deducción es imposible, que ya hemos alcanzado un fondo estocástico final. Si es así, entonces el azar es más básico que la causalidad. Pero ¿es realmente así? En realidad, no lo sabemos. Creo que es posible, aunque improbable, que las actuales leyes probabilistas se deduzcan de leyes no probabilistas. En todo caso a nadie debiera prohibírsele que lo intente. Incluso tentativas fracasadas pueden enseñarnos algo. En este caso, la búsqueda de una teoría no estocástica más profunda ha sido fructífera, no porque la haya encontrado, sino porque ha mostrado que nuestra creencia en las teorías actuales puede llevarse a extremos dogmáticos que no ayudan en la búsqueda de nuevas verdades. Como he sugerido hace un momento, personalmente no creo que se pueda encontrar una teoría no estocástica en la base de la teoría cuántica actual. Pero aun cuando se la encontrara, no por ello se probaría que la causalidad es una categoría más básica que el azar. En efecto, esas leyes más fuertes podrían ser de otro tipo, ni causal ni probabilista. O, si resultan causales, podrían no ser finales: podría suceder que emergiesen de rasgos aleatorios aún más profundos. Parece, pues, prudente afirmar que ni el azar ni la causalidad son modos últimos, irreducibles, de ser y de devenir.

2.4. *Determinismo: clásico y contemporáneo*

La existencia de leyes estocásticas nos ha obligado a abandonar el determinismo clásico o, más bien, nos ha forzado a rejuvenecer y desarrollar el determinismo, como he argüido en mi *Causalidad*.² Ya no exigimos que todo proceso sea causal. Suponemos en cambio que todo proceso sea *legal*, esto es, que todo suceso y toda cadena de sucesos satisfaga un conjunto de leyes, sean éstas causales o no. Algunas de éstas serán meras leyes de sucesión, otras serán pautas de interacción, finalmente otras lo serán de causación, o bien de determinación estocástica. Reconocemos éstos y acaso otros tipos de legalidad y creemos que las leyes son mucho más que regularidades observadas, puesto que cualquier regularidad observada durante un corto tiempo (como es el caso de casi todas las regularidades) puede resultar accidental. Creemos que las leyes son pautas objetivas y estables.

² M. Bunge, *Causalidad*, trad. H. Rodríguez, EUDEBA, Buenos Aires, 1961.

Lo que no abandonamos, entonces, es el principio de legalidad o principio de uniformidad de la naturaleza. Ciertamente, éste no es un principio científico sino más bien metafísico. Pero no es una idea metafísica incontralada, puesto que motiva la búsqueda de leyes, que es la esencia de la investigación científica, y es confirmada por los éxitos de ésta. Otro principio metafísico que conservamos es la hipótesis de que nada surge de la nada ni se convierte en nada. También éste es un principio fértil en la conducción de la investigación científica. Si combinamos este principio con el de legalidad, obtenemos el principio neodeterminista: *Toda transformación procede conforme a leyes*. Estas leyes no son de hechura humana pero podemos conocerlas, aunque sea gradual e imperfectamente. Lo que es producto humano es cada fórmula, cada ecuación que se propone representar una pauta objetiva.

En resumen, actualmente reconocemos el azar como modo objetivo de ser y de devenir y, más aún, como sujeto a ley. Hemos logrado descubrir algunas de las leyes del azar, a menudo llamadas leyes estocásticas, y hemos advertido que son tan importantes como las leyes estocásticas. Por ejemplo, la mayoría de las leyes que se encuentran en la psicología matemática, y en particular en la teoría del aprendizaje, son estocásticas: conciernen, por ejemplo, a la probabilidad de un acontecimiento como función de la probabilidad del mismo en una ocasión anterior. Mediante leyes estocásticas se puede predecir y explicar, de manera estadística, los acontecimientos casuales a que ellas se refieren. Más aún, sobre la base de tales predicciones podemos obrar con eficacia, por ejemplo para modificar ciertos parámetros estadísticos a voluntad. Las teorías estocásticas, en suma, nos permiten entender los procesos aleatorios y controlarlos. Son valoradas por el teórico y por el experimentador, por el ingeniero, el agrónomo y el educador. No hay campo del conocimiento ni de la acción racional libre de ideas estocásticas.

Con este proceso de dominio teórico y práctico del azar, éste ha dejado de ser misterioso y por lo tanto temible. Pero el concepto de azar, acaso aún más que el de causalidad, sigue desafiando a nuestro ingenio, sacudiendo nuestras certezas superficiales, y arruinando todo plan rígido que no deje lugar al azar, a lo que no es predecible individualmente. El descubrimiento de que el azar es un modo objetivo de ser y devenir nos ha tornado más flexibles. Pero hay una idea que ha permanecido inalterada a través de la revolución estocástica: la convicción de que el mundo es legal y de que es posible conocer sus leyes, incluso las leyes del azar y las leyes de las transiciones de ciertos tipos de orden a otros. Por consiguiente, la revolución estocástica ha ensanchado el dominio de la investigación científica sin cambiarla de manera esencial: la ciencia sigue siendo una búsqueda metódica de leyes objetivas.

MARIO BUNGE

MCGILL UNIVERSITY, MONTREAL