

La irreversibilidad en la naturaleza

RAÚL SALGADO GARCÍA

Raúl Salgado García realizó su doctorado en la Facultad de Ciencias de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos y tres estancias posdoctorales, una en el Instituto de Física de la UASLP (San Luis Potosí, México), en el Centre de Physique Théorique de la École Polytechnique (París, Francia) y en el Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México. Desde agosto de 2010 es Profesor Investigador de Tiempo Completo adscrito al Centro de Investigación en Ciencias de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM) incorporado al Cuerpo Académico de Física Estadística del cual es responsable desde agosto 2019. Perteneció al Sistema Nacional de Investigadores y es perfil PRODEP. Es miembro de la Academia de Ciencias de Morelos.

Esta publicación fue revisada por el comité editorial de la Academia de Ciencias de Morelos.

¡Rebobina! ¡No quiero ver el final!

Me encuentro cómodamente sentado en mi sofá para ver una película. Hoy en día la tecnología ha vuelto muy fácil este asunto, solo encendemos la pantalla de plasma que se conecta automáticamente a internet y voilà, ahí tienen todo un enorme repertorio de películas para satisfacer desde audiencias voraces hasta los cinéfilos más exigentes. Aún recuerdo las viejas videocassetas VHS; para ver *El karate kid* tuvimos que rentar un cassette casi del tamaño de una tablet pero con el triple de grosor. Algunas veces al comenzar a reproducir la película uno se percataba de que la cinta estaba casi al final ¡alerta de spoiler! casi veíamos el final antes de siquiera comenzar a verla. Había que rebobinarla. Cuando la película se rebobinaba era como si estuviéramos viendo un viaje hacia atrás en el tiempo, se notaba fácilmente como floreros que estaban rotos volvían a su estado anterior, immaculados, o cómo la lluvia comenzaba a subir al cielo, fenómenos que naturalmente no ocurren. Ni soñar. Hay una bella asimetría en la naturaleza que podemos apreciar a simple vista, una asimetría que nos indica en qué sentido transcurre el tiempo y en qué sentido es imposible (véase Figura 1). Muchos fenómenos que observamos cotidianamente no se pueden revertir de forma natural; y eso es lo que en Termodinámica se suele denominar la *flecha del tiempo* [1]. Esta es una ley universal, se cumple para objetos minúsculos como el interior de una célula y para objetos enormes como las galaxias o los agujeros negros. “Todo tiende al desorden” reza una interpretación popular de la segunda ley de la termodinámica que se puede formular matemáticamente en términos de un concepto denominado *entropía* [2]. Pero la historia no termina

ahí. Esta ley de irreversibilidad (o asimetría temporal) no es, sin embargo, válida a nivel microscópico, en ese mundo gobernado por las leyes de la Mecánica Cuántica. A escalas de los átomos, las leyes físicas son enteramente reversibles temporalmente. Esto quiere decir que, si pudiésemos grabar una cinta del “movimiento” de los átomos, y la exhibiéramos en una pantalla, al rebobinarla, no sabríamos si el tiempo ocurre hacia adelante o hacia atrás. Y no es porque nos falte experiencia con el mundo microscópico, sino porque simplemente la física nos prohíbe saberlo. Eso es lo que Física estadística se conoce como *reversibilidad microscópica*.

de cada átomo o molécula del sistema. Es decir, lo que Loschmidt proponía era, en esencia, hacer que la “cinta” de la realidad fuera echada a andar al revés, como si rebobináramos la “película” y la viésemos en reversa. Y ninguna ley física prohíbe que esto suceda, sin embargo, el poder observar este fenómeno de manera natural costaría un largo, muy largo tiempo, algunos cálculos indicarían se necesitaría esperar veces la edad del universo [7] solo para que nuestro café matutino pase espontáneamente de estar frío a estar caliente; se nos haría algo tarde para ir al trabajo.

Otros esfuerzos para tratar de resol-

la gente no sale de los carros del metro y otra en donde salen apresuradamente. En el primer caso ninguna persona sale de metro y de igual manera, al no haber espacio en el metro es imposible que ninguna persona aborde. No hay flujo de personas. En termodinámica, esa situación de ausencia de flujo la llamaríamos “estado de equilibrio”. Ahora imaginen la segunda situación en la que una gran cantidad de personas abandonan el carro, provocando que las personas que esperan en la estación puedan ingresar a los espacios que se han generado. Esta situación nos muestra que al haber una “fuerza” que mueve a la gente fuera del tren, se genera automáticamente una



Diffusion

FIGURA 1. PROCESO irreversible. La difusión es un proceso en donde el sentido del tiempo nos es intuitivamente claro; una gota de tinta que se difunde en agua termina completamente disuelta. Una vez disuelta la tinta, la tinta no vuelve en forma natural al estado inicial en donde la tinta se encuentra sin disolverse en el agua. Fuente: Wikipedia [3].

Pero esperen, rebobinemos y analicemos lo que he escrito. Las leyes de la física nos dicen que a escalas *mesoscópicas* (esto es, de tamaño intermedio entre lo microscópico y lo macroscópico, como el interior de una célula) y *macroscópicas*, la materia se comporta en forma irreversible. Pero los constituyentes microscópicos de esa misma materia se rigen por leyes que son reversibles ¿no les parece contradictorio? Pues sí. Resulta definitivamente contradictorio y una de las primeras personas en notar esto fue Ludwig Boltzmann, quien se propuso explicar la Termodinámica basado en las teorías que describen el mundo microscópico. De esta manera Boltzmann trató de conciliar esta aparente contradicción, aunque desafortunadamente su teoría fue no muy bien recibida por aquellos años, en los albores del siglo veinte, ¿cuando aún se dudaba seriamente de la existencia misma de los átomos! [4]. Una de las críticas que recibió Boltzmann se debe a un amigo suyo llamado Josef Loschmidt [5,6], quien argumentó que no era físicamente imposible preparar un sistema termodinámico para observar un fenómeno que no conducía al equilibrio, sino que se alejaba de éste. Todo lo que había que hacer era preparar al sistema en una condición inicial muy particular, revirtiendo la dirección de la velocidad

ver este misterio de la irreversibilidad macroscópica han merecido incluso el prestigioso Premio Nobel. Por citar un ejemplo, Lars Onsager, profesor universitario estadounidense de origen noruego, fue galardonado con el Premio Nobel de Química por “el descubrimiento de las relaciones de reciprocidad que llevan su nombre, las cuales son fundamentales para la termodinámica de procesos irreversibles” [8]. En otras palabras, Onsager recibió el premio Nobel por haber descubierto a partir de un análisis teórico que la reversibilidad microscópica es indispensable para obtener una ley de simetría macroscópica. Esta última establece que cuando se imprime una fuerza en un sistema termodinámico se establece un flujo, que a su vez causa un desequilibrio en otra variable termodinámica provocando la aparición de otro flujo en la dirección opuesta. Es lo que se conoce como flujos acoplados. Muy complicado, ¿no? Bueno, déjenme establecer una analogía de esta situación. Imaginen la estación del metro más concurrida de CDMX. Si han estado ahí alguna vez seguro se habrán dado cuenta del flujo de personas que entran y salen de los carros de manera apresurada. Imaginemos un carro repleto de gente que llega a una estación igualmente abarrotada y consideremos dos situaciones: una en donde

“fuerza” que impulsa a las personas que esperan en la estación a moverse al interior de los carros. Y esto es provocado por haberse generado “huecos” cuando la gente empezó a abandonar el tren.

Las fuerzas de las que hablo en esta analogía son claramente metafóricas; por supuesto, la fuerza que obliga a las personas a entrar o salir del tren es un motivo para salir de la estación tal vez por trabajo o simplemente para desplazarse a otra estación. En termodinámica esta “fuerza” la denominamos fuerza termodinámica y por citar solo un puñado de ejemplos podríamos señalar i) diferencia de temperaturas ii) diferencia de presión o iii) diferencia de potencial eléctrico. Cada una de estas fuerzas termodinámicas generan un correspondiente flujo. Una diferencia de temperatura genera un flujo de calor, una diferencia de presión genera un flujo de materia mientras que un flujo de potencial eléctrico genera una analogía de esta situación. Estas fuerzas termodinámicas y sus correspondientes flujos se pueden apreciar en diferentes escenarios de la vida cotidiana. Por ejemplo, una diferencia de temperatura se establece cada mañana al prepararnos un café, encendemos la cafetera y generamos una diferencia de temperatura entre el agua fría y la plancha caliente

registro de mediciones de alguna variable en la que se pueden apreciar los cambios que ocurren a lo largo del tiempo. Y no es sorpresa que el mundo esté plagado de series de tiempo en esta era digital. La raza humana ha registrado una cantidad inimaginable de los cambios que observa en la naturaleza desde tiempos inmemoriales: el número de habitantes de una ciudad, la cantidad de lluvia en cada estación del año, los movimientos de los astros, la temperatura de una ciudad, y un largo etcétera. Para obtener una serie de tiempo se toman mediciones de algunas variables físicas mediante un aparato de medición. Por ejemplo, un termómetro de pared nos ofrece una medición: la temperatura ambiental. Esta medición claramente no es constante, cambia a lo largo del tiempo; la temperatura a las primeras horas del día seguramente es más baja que al medio día, cuando el sol está en su punto más alto. Si registrásemos la temperatura día con día en una li-

brera o en un archivo de datos en la computadora, esos registros serían lo que denominamos serie de tiempo. Una serie de tiempo es entonces un registro a lo largo del tiempo de mediciones de alguna variable hechas con algún instrumento. Incluso, hoy en día, nuestros teléfonos inteligentes, computadoras, tabletas electrónicas y casi cualquier otro *gadget* conectado a internet constantemente registran datos, los almacenan y se analizan para entender nuestro comportamiento, información que muchas empresas utilizan para vendernos productos o servicios. Una vez obtenida una serie de

tiempo se puede visualizar en una gráfica en donde podemos apreciar los cambios en el tiempo de un solo vistazo tal como se muestra en la Figura 2. ¿Pero qué significa medir la irreversibilidad de una serie de tiempo? Para entender mejor de qué trata este concepto voy a exponerles un ejemplo concreto de esta situación. Imaginen que echamos una moneda y asociemos a cada cara un número. Podemos tomar un marcador y escribir un “1” en una de las caras y escribir un “0” en la otra. Y nos ponemos a echar volados sucesivamente. Por ejemplo, yo tomé una moneda y obtuve los siguientes valores después de lanzar tres veces la moneda: 100. Podemos ver que si invertimos el orden de los resultados obtendríamos lo siguiente: 001. Podemos ver con claridad que las secuencias de números no son iguales, es decir, no las podemos leer igual hacia adelante que hacia atrás. Parece que esta secuencia es *irreversible*. Pero debemos tener cui-

da, desde perspectivas novedosas o diferentes. Este diálogo entre disciplinas científicas ha tenido cierto éxito al comprender y explicar una amplia variedad de fenómenos en diversas ramas de la ciencia, un diálogo que seguramente continuará por largo tiempo.

Referencias

- [1] Flechas en el tiempo, Sergio de Régules, Revista de la Universidad, 2019. <https://www.revistadelaulniversidad.mx/storage/2a1ebcc4-1b30-4ff3-9c99-4ca99e8b4e82.pdf>
- [2] <https://es.wikipedia.org/wiki/Entrop%C3%A9a>
- [3] <https://en.wikipedia.org/wiki/Diffusion>
- [4] https://es.wikipedia.org/wiki/Ludwig_Boltzmann
- [5] https://es.wikipedia.org/wiki/Paradoja_de_Loschmidt
- [6] *The demons haunting thermodynamics*, Katie Robertson. *Physics Today* 74, 11, 44 (2021); <https://doi.org/10.1063/PT.3.4881>
- [7] <https://es.wikipedia.org/wiki/Ireversibilidad>

- [8] <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1968/summary/>
- [9] *Time-irreversibility test for random-length time series: The matching-time approach applied to DNA*, R. Salgado-García. *Chaos* 31, 123126 (2021);
- [10] ADN basura: negacionismo y malentendidos (con cebolla) Primera parte (junio 2017). <https://culturacientifica.com/2017/06/16/adn-basura-negacionismo-malentendidos-cebolla-primera-parte/>
- [11] ADN basura: negacionismo y malentendidos (con cebolla) Segunda parte (junio 2017). <https://culturacientifica.com/2017/06/23/adn-basura-negacionismo-malentendidos-cebolla-segunda-parte/>

Esta columna se prepara y edita semana con semana, en conjunto con investigadores morelenses convencidos del valor del conocimiento científico para el desarrollo social y económico de Morelos. Desde la Academia de Ciencias de Morelos externamos nuestra preocupación por el vacío que genera la extinción de la Secretaría de Innovación, Ciencia y Tecnología dentro del ecosistema de innovación estatal que se debilita sin la participación del Gobierno del Estado.

La irreversibilidad de las películas.

Para entender qué sucede cuando pasamos del mundo microscópico al mundo macroscópico una de las cosas que se puede hacer es medir la irreversibilidad. La razón de medir esta propiedad es porque queremos entender qué mecanismos son responsables de la contradicción mencionada anteriormente. Si tuviésemos un indicio de cómo las leyes de la física cambian de una escala a otra tal vez podríamos entender por qué la materia se organiza de forma diferente cuando tenemos un puñado de átomos que cuando tenemos una cantidad enorme de éstos. Con esta herramienta podríamos intentar comprender cómo funcionan muchos otros fenómenos que aún se escapan a nuestra comprensión. Por ejemplo, una célula viva, sea de un animal, vegetal o incluso una bacteria, esta compuesta por un sinnúmero de pequeñas *máquinas moleculares* que trabajan en una armonía tan perfecta que ni el mejor ingeniero de este mundo podría diseñar algo tan complejo y preciso. Y en toda esa maquinaria solo intervienen las leyes de la física. Si, se puede medir el grado de irreversibilidad de un sistema a partir de una “película”. Pero en la física no tenemos cintas grabadas con imágenes de observaciones hechas, sino más bien datos codificados en números. Nuestras películas de la naturaleza las llamamos *series de tiempo*. Por ejemplo, seguramente recordará cómo tus padres medían cómo cambiaba tu estatura a lo largo de los meses y años registrándola con marcas en la pared con un lápiz. ¡Eso es una serie de tiempo! Es un

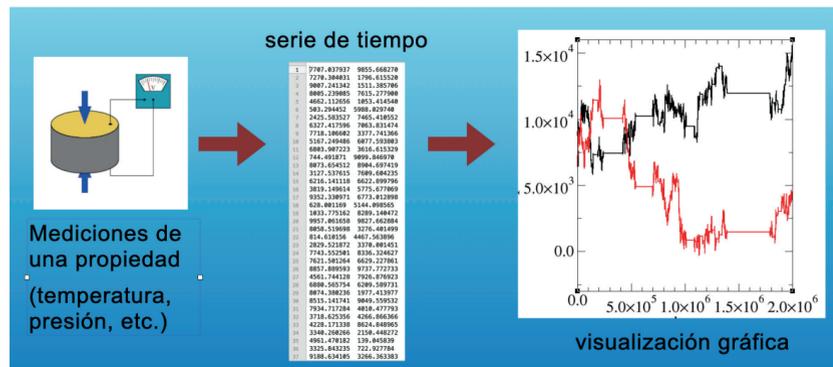


Figura 2. Registro y visualización de series de tiempo. Cuando se usa algún instrumento para medir alguna variable física los datos se registran como números en un listado que se guarda como un archivo de computadora. Luego, estos datos pueden ser representados mediante una gráfica para tener a la vista los cambios ocurridos a lo largo del tiempo. Fuente: elaboración propia.

dato. Resulta que si yo hiciera una repetición del experimento (lanzar nuevamente tres veces la moneda), tal vez podría obtener el resultado siguiente: 100. Es decir, podría obtener la secuencia que obtuve al principio, pero invertida, y si la probabilidad de obtener ambas secuencias es la misma entonces diremos que la secuencia es *estadísticamente reversible* (véase Figura 3). Y esto es lo que en realidad sucede al echar volados, y en general podemos decir que ‘lanzar volados’ es un *proceso reversible*. Suena raro ¿verdad? Esta definición de reversibilidad e irreversibilidad en términos estadísticos es lo que nos permite saber qué

mación genética funcional [10,11]. Solo aparentemente. Desde el punto de vista biológico, el poder distinguir entre ambas clases de material genético es muy importante, pues uno de los problemas actuales de las ciencias genómicas es hallar y decodificar la información contenida en el ADN. Este último ejemplo nos muestra cómo una propiedad física, cuyo origen se encuentra en la termodinámica, puede tener una aplicación en la biología. En realidad, esta es una tendencia de la física actual, en donde se ha visto la posibilidad de utilizar las herramientas propias de la física para el estudio de otros fenómenos en la naturale-



Figura 3. Cuando lanzamos tres veces una moneda cuyas caras hemos etiquetado con ‘0’ y ‘1’, el resultado ‘100’ tiene exactamente la misma probabilidad de que ocurra el resultado ‘001’. Debido a esta propiedad podemos decir que el proceso de ‘lanzar volados’ es *reversible* desde un punto de vista estadístico. Cuando Fuente: elaboración propia.