

## AUTORIDADES ACADÉMICAS

*Rector: Dr. Guillermo R. Tamarit*

*Vicerrectora: Mg. Danya V. Tavela*

*Secretaria Académica: Abog. Ma. Florencia Castro*

*Secretaria de Investigación, Desarrollo y Transferencia: Mg. Silvina Sansarriq*

*Secretario de Extensión Universitaria: Lic. Juan P. Itoiz*

*Secretario General: Abog. Diego J. Batalla*

*Secretaria de Asuntos Económico-Financieros: Cdora. Mariela E. García*

*Secretaria de Cultura: Lic. Laura Durán*

*Directora Centro de Edición y Diseño: DCV Ma. de las Mercedes Filpe*

*Guardasellos: Ing. Luis J. Lima*

DIRECTOR DE LA REVISTA

*Dr. Ángel L. Plastino*

---

## SUMARIO

### #3 ENSEÑANZA DE LA BIOLOGÍA

**PÁG. 4 – FÍSICA ESTADÍSTICA,  
REDES NEURONALES Y FREUD**

*ROSELI S. WEDEMANN; ÁNGEL R. PLASTINO*

**PÁG. 11 – DIVERSIDAD DE ESCARABAEIDOS  
EN CINCO LOCALIDADES DEL NOROESTE  
DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES**

*MARÍA A. MARCELLINO; JIMENA CHILA COVACHINA; CAROLINA SGARBI;  
KARINA BERTONE; ARIEL YAPUR; MÓNICA RICCI*

**PÁG. 18 – LA EVOLUCIÓN Y EL MÉTODO  
CIENTÍFICO COMO CIMIENTOS  
DE LA ENSEÑANZA DE LA BIOLOGÍA**

*MARÍA J. APODACA; LILIANA KATINAS; JORGE V. CRISCI*

**PÁG. 29 – MOTORES MOLECULARES**

*CONSTANCIO M. ARIZMENDI*

**PÁG. 35 – MECANIZACIÓN DE LA COSECHA  
DEL OLIVAR: ÚNICA ALTERNATIVA  
ECONÓMICAMENTE SUSTENTABLE  
EN LA PRODUCCIÓN DEL ACEITE DE OLIVA**

*JACINTO DIAB; REINALDO LEUCI*

**PÁG. 41 – ECONOFÍSICA:  
LA FÍSICA DE LOS MERCADOS  
FINANCIEROS**

*AURELIO FERNÁNDEZ BARIVIERA*

---

#### Edita



CEDI Centro de Edición y Diseño. UNNOBA  
DCV Ma. de las Mercedes Filpe

Callao 289 3.º piso, CP. 1022  
Tel 54 11 53531520. Ciudad Autónoma  
de Buenos Aires, Argentina

#### Diseño y diagramación

CEDi Centro de Edición y Diseño  
Coordinador: DCV Cristian Rava,  
DCV Claudia Di Paola, DCV Bernabé Díaz

Corrector de estilo: Mariángel Mauri  
Fotografía: DG Sofía Ginestra

#### Impresión

Buschi S.A.

Año 2 N.º 3

Marzo de 2016

Tirada 500 ejemplares

ISSN 2408-4492

Queda hecho el depósito  
que marca la ley 11723

*Se invita a potenciales colaboradores  
a remitir sus trabajos al CEDI  
(cedi@unnoba.edu.ar)*

#### Sede Junín

Libertad 555, CP. 6000  
Tel 54 236 4407750  
Junín, prov. de Buenos Aires, Argentina

#### Sede Pergamino

Monteagudo 2772, CP. 2700  
Tel 54 2477 409500.  
Pergamino, prov. de Buenos Aires, Argentina

[www.unnoba.edu.ar](http://www.unnoba.edu.ar)

# EDITORIAL

Acercamos al amable lector el tercer número de la revista de divulgación NÚCLEOS, de la Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires, en el que se abordan temas de naturaleza biológica, desde diversas perspectivas, con una interesante y muy importante temática.

María José Apodaca, Liliana Katinas y Jorge Crisci son investigadores del Museo de La Plata, perteneciente a la Facultad de Ciencias Naturales y Museo de la Universidad Nacional de La Plata, una institución científica señera de Argentina. Tratan aquí el concepto central de la biología, la evolución, desde un punto de vista novedoso e iluminador, relacionado con la enseñanza de esta ciencia.

Constancio Miguel Arizmendi nos entrega una descripción fascinante de los motores moleculares, que permiten el funcionamiento de las células biológicas y que, en poco tiempo más, a medida que vayamos entendiendo mejor sus mecanismos intrínsecos y la física subyacente, de modo que podamos controlarlos, transformarán nuestras capacidades tecnológicas de maneras que hoy son inimaginables.

Roseli Suzi Wedemann y Ángel Ricardo Plastino delimitan algunos aspectos de una de las fronteras de la investigación científica contemporánea: la descripción del cerebro en términos computacionales y de redes neuronales, y detallan algunos modelos tentativos que ofrecen promesas ciertas de que estamos comenzando a entender algunos de los problemas de la conciencia a partir de técnicas de la física.

Aurelio Fernández Bariviera nos acerca a una de las más interesantes nuevas disciplinas científicas que emergen en el siglo XXI: la llamada econofísica, que emplea técnicas de la física teórica para aplicarlas a todo tipo de problemas económicos. En este artículo se discuten tratamientos referentes a los mercados financieros.

M. A. Marcellino, J. Chila Covachina, C. A. Sgarbi, K. Bertone, A. Yapur y M. Ricci, desde la perspectiva de la transformación de ecosistemas naturales con fines productivos mediante prácticas agronómicas que influyan positivamente en la biodiversidad, relevan las especies de gusanos blancos en cinco localidades del noroeste bonaerense y determinan la diversidad y la especie dominante en sistemas de producción agrícola.

Finalmente, Jacinto Diab y Reinaldo Leuci, en una vena aplicada, describen algunos aspectos importantes sobre la mecanización de la cosecha de la oliva como alternativa tecnológica que posibilite que nuestro país mejore su situación en el mercado internacional de este producto.

Confiamos plenamente en que este abanico de problemáticas ha de suscitar el interés de nuestros lectores.

***Dr. Ángel Luis Plastino***  
Director revista NÚCLEOS

DR. AURELIO FERNÁNDEZ  
BARIVIERA

# ECONOFÍSICA: LA FÍSICA DE LOS MERCADOS FINANCIEROS

## INTRODUCCIÓN

Desde hace ya más de una década ha venido ganando fuerza una nueva disciplina, llamada econofísica, que utiliza técnicas y paradigmas propios de la física estadística y teórica y los aplica a sistemas económicos. Fue el profesor H. E. Stanley, editor jefe de la prestigiosa revista *Physica A*, quien allá por 1996, la bautizó con este nombre. Desde esa fecha hasta aquí el crecimiento de la literatura en econofísica ha sido exponencial. En gran parte este incremento es debido a la disponibilidad de datos de mayor frecuencia y a la capacidad de procesamiento de dichos datos por medio de las computadoras. Hoy en día podemos encontrar no solamente los datos diarios de cierre o apertura de diferentes mercados financieros, sino también datos intradiarios e incluso datos operación a operación. Se trata de lo que llaman datos de ultra alta frecuencia. Esta enorme cantidad de datos puede llegar a ser del orden de varios *terabytes* (TB) en el caso de las operaciones realizadas durante un año en un mercado como la Bolsa de Nueva York.<sup>1</sup> Manejar tan enorme masa de datos supone, por un lado, un desafío teórico para el desarrollo de nuevos modelos y, por otro lado, un importante problema de procesamiento de los datos para obtener información útil para la toma de decisiones. Se necesitan computadoras con suficiente capacidad de procesamiento y lenguajes de programación versátiles para poder poner en práctica los algoritmos necesarios.

En este artículo proponemos mostrar que la influencia de la física en la economía se ha venido produciendo desde hace muchos años, aunque apenas en las últimas décadas esta nueva disciplina se ha insertado entre la física y la economía con modelos y forma de trabajo propios.

## EL EQUILIBRIO DE MERCADO Y LA FÍSICA DEL EQUILIBRIO

Varios economistas notables han sido físicos e ingenieros. Algunos de ellos hicieron licenciatura en física o ingeniería y después se especializaron en economía. Así, Vilfredo Pareto comenzó como ingeniero civil, pero se hizo famoso en economía por las nociones de optimalidad y por el estudio de la distribución de ingresos en una sociedad. Otro ejemplo es Léon Walras, uno de los autores claves en la llamada escuela marginalista, que también era ingeniero. En su caso, utilizó la analogía con nociones de la mecánica clásica para definir el equilibrio de mercado. También apostó por el uso del cálculo infinitesimal en su propuesta de análisis de cantidades marginales.

De todos modos, durante la primera mitad del siglo XX, la economía era una ciencia que se enseñaba de manera cualitativa y no matemática. Es en la segunda mitad de dicho siglo cuando la formali-

zación matemática cobra importancia. Una obra fundamental en la educación de varias generaciones de economistas fue el libro del premio nobel Paul A. Samuelson *Fundamentos del análisis económico*. El *mainstream* del pensamiento económico fue desarrollando una ciencia completamente teórica. Desde entonces, los libros de economía han privilegiado un elaborado formalismo, a expensas del contacto con la observación. En este sentido, mucho tiene que ver un libro publicado por otro famoso economista y también premio nobel. En 1966, Milton Friedman publicó un controvertido ensayo titulado “La metodología de la economía positiva”, un artículo de lectura obligatoria en cualquier curso de metodología de la ciencia en los doctorados en economía a lo largo del mundo. Allí fija las bases de un programa de investigación en economía en el que establece que el realismo de los supuestos es irrelevante. Textualmente dice:

En la medida que pueda afirmarse que una teoría posee ‘supuestos’ y que su ‘realismo’ puede ser considerado independientemente de la validez de las predicciones, la relación entre la importancia de una teoría y el ‘realismo’ de sus ‘supuestos’ es justamente la opuesta de lo que sugiere la opinión criticada. Ciertamente que hipótesis verdaderamente importantes y significativas poseen ‘supuestos’ que no son representaciones descriptivas arbitrariamente inexactas de la realidad y, en general, puede afirmarse que cuanto más significativa es la teoría más irreal serán sus supuestos (en este sentido). La razón es sencilla. Una hipótesis es importante si ‘explica’ mucho con poco, o sea, si abstracta los elementos comunes y cruciales de la masa de circunstancias complejas y detalladas que rodean al fenómeno que va a explicarse y permite unas predicciones válidas. Por lo tanto, una hipótesis para ser importante debe poseer supuestos descriptivamente falsos, ya que no toma en cuenta la mayor parte de las circunstancias reales, puesto que su auténtico éxito reside en mostrar su irrelevancia para explicar el fenómeno de que se trata (pp. 367-368).

El método propuesto por Friedman lleva muchas veces a un divorcio entre la observación de la realidad y la teoría construida académicamente. Dada la influencia de la escuela de Chicago en la formación económica, se entiende que la ciencia económica se haya construido, durante los últimos setenta años, de espaldas a la realidad. Así, supuestos como el comportamiento racional de los agentes económicos, o la construcción de un modelo basado en un “agente representativo”, son moneda corriente de cualquier artículo publicado en revistas económicas.

En este aspecto, la física ofrece muchos ejemplos de una interacción fructífera entre la teoría y la observación. En verdad, tal interacción es esencial. Debemos tener en cuenta que los procesos económicos constituyen sistemas complejos en los que no todas las interacciones son observables y difícilmente medibles. Algunos modelos desarrollados en una rama de la física llamada física estadística permiten incorporar agentes heterogéneos y pensar que hay vida más allá del equilibrio!

Por tanto, la econofísica, como nueva disciplina, pretende tender un puente entre un riguroso modelo teórico y su compatibilidad con la realidad observacional. Dentro de todo el espectro de problemas que abarca la economía, es quizás en las finanzas donde la presencia de los econofísicos se ha hecho más fuerte. Veremos en el resto del artículo un panorama del aporte de la econofísica al conocimiento más profundo de la dinámica de los precios en los mercados financieros.

## **LA MECÁNICA DE LOS PRECIOS EN LOS MERCADOS FINANCIEROS: LA HIPÓTESIS DEL MERCADO EFICIENTE**

Existe una clásica definición en finanzas que dice: “Un mercado es eficiente en sentido informativo si los precios de los activos incorporan toda la información relevante completa e instantáneamente”.

En definitiva, aquí se fijan las bases para explicitar que en un mercado los precios deben reflejar información disponible: la que tenga el operador en forma directa o en forma indirecta. El estudio de la eficiencia informativa de los mercados de valores resulta relevante ya que estos son sistemas que permiten al inversor comprar o vender títulos a precios “justos y equitativos”. Estos precios serán “justos y equitativos”, siempre que el mercado sea eficiente en sentido informativo. Decimos que un mercado es eficiente en sentido débil, si tiene incorporados los precios pasados, lo cual hace imposible obtener rendimientos extraordinarios en base al conocimiento de la serie de precios y rendimientos históricos. Bajo el supuesto de agentes neutrales al riesgo, este subtipo de eficiencia es equivalente a decir que la serie de rendimientos es un paseo aleatorio, lo cual hace completamente imposible la predicción de los rendimientos basados en datos históricos.

La principal implicación de la Hipótesis del Mercado Eficiente (HME) es que es imposible obtener en forma sistemática ganancias extraordinarias a partir del conjunto de información disponible. En otras palabras, no existen estrategias de negociación que permitan obtener rendimientos por encima de los costos de transacción y de la prima de riesgo en forma consistente. Podríamos decir que se trata de una aplicación del principio ricardiano de la ventaja comparativa.<sup>2</sup> La información que está en poder de todos no puede generar beneficios extraordinarios. Solo las estrategias de negociación basadas en alguna información diferencial (ventaja comparativa) podrían proporcionarnos estas ganancias. Por tanto, el valor de la información depende, de forma inversa, de su dispersión.

Muchas veces se intenta atacar la HME diciendo que tal o cual administradora de fondos ganó más que el promedio del mercado en un determinado año. Sin embargo, si analizamos detenidamente este tipo de información nos damos cuenta de que este tipo de acontecimientos está previsto rigurosamente por la matemática estadística. Si suponemos que una cartera de acciones elegida al azar tiene un 50% de probabilidades de mejorar el índice de mercado en un determinado año, y si suponemos que un individuo elige cada año, durante diez años, una dada cartera, la probabilidad de superar al mercado consistentemente durante esos diez años es de casi 1 entre 1000. Sin embargo, si 2000 individuos eligen al azar carteras durante diez años, es probable que al menos uno mejore el mercado en cada uno de esos diez años.<sup>3</sup> Por tanto, el hecho de encontrar algún individuo que mejora el mercado en forma consistente no es necesariamente un indicador de ineficiencia de ese mercado. Simplemente, puede deberse a una cuestión de azar.

## LA PROTOTEORÍA DEL MERCADO EFICIENTE

La predictibilidad de los precios y rendimientos de las acciones han suscitado la inquietud tanto de académicos como de inversores desde hace mucho tiempo. Tanto es así que se ha tratado de encontrar patrones o dinámicas de comportamientos de diversa índole.

El primer trabajo del cual se tiene registro sobre el estudio del proceso estocástico que describe el comportamiento de los precios de activos financieros pertenece a un matemático francés llamado Louis Bachelier. Podríamos decir que su tesis doctoral, defendida en el año 1900 constituye el primer compendio de econofísica. Su trabajo no solo realiza un estudio teórico sobre procesos estocásticos, sino también un análisis empírico sobre la dinámica de precios de un bono del gobierno francés y la primera formulación de la teoría del movimiento browniano. El movimiento browniano es un modelo de movimiento aleatorio de una partícula en el espacio. Su nombre se debe al botánico inglés Robert Brown que, en 1828, fue el primero en observar el movimiento continuo e irregular de las partículas de polen en una solución acuosa. Tal movimiento fue interpretado como la consecuencia de los impactos que el polen recibía de las moléculas sujetas a agitación térmica. El estudio del movimiento browniano fue desarrollado en forma independiente por Bachelier en su tesis doctoral de 1900 y por Albert Einstein en uno de los artículos que publicó en 1905, su *Annus mirabilis*.

## EL MOVIMIENTO BROWNIANO

Formalmente, el movimiento browniano se define como un proceso estocástico sobre tiempo continuo y variable continua en el cual los cambios consecutivos en la variable  $Z$  son estadísticamente independientes y para cambios infinitesimales en el tiempo se verifica que  $dz = \varepsilon \sqrt{dt}$  donde  $\varepsilon \sim N(0,1)$ . En definitiva, lo que implica un movimiento browniano es un proceso sin memoria, en el que el valor que adopta la variable no depende de su valor pasado.

El movimiento browniano estándar es representado por una distribución de probabilidad sobre el conjunto de funciones reales  $Z(t)$ ,  $0 \leq t \leq \infty$  con las siguientes propiedades:

- $Z(0) = 0$  con probabilidad 1.
- Para todo  $t > 0$  y  $a > 0$ , los incrementos  $Z(t+a) - Z(t)$  son gaussianos con media cero y varianza  $a$ .
- $Z(t+a) - Z(t)$  es independiente de  $\{Z(s), 0 \leq s \leq t\}$ .

## EL MODELO DE BACHELIER

El objeto de la tesis de Bachelier era formalizar una expresión que describiera la probabilidad de variación de precios de un instrumento financiero, conociendo su precio de contado. En concreto, construyó un modelo para los precios de unos determinados bonos franceses y estimó las probabilidades de éxito en la especulación con unos derivados *sui generis* de esos bonos, que serían unos productos que se encuentran a medio camino entre los productos financieros llamados *futuros* y *opciones*, que hoy en día se negocian en todas las bolsas del mundo.

Bachelier supuso que el precio de las acciones es una variable aleatoria y que los cambios en los precios son independientes e idénticamente distribuidos, tal que:

$$\text{Prob}\{\tilde{Z} < Z^* \mid \tilde{Z} = Z\} = F(Z^* - Z, t) \quad [1]$$

Donde  $F(\cdot)$  es la función de distribución acumulada de los precios de las acciones. Esta ecuación expresa que la probabilidad de que el precio de la acción dentro de  $t$  períodos ( $\tilde{Z}$ ) sea menor o igual a un cierto valor,  $Z^*$ , sabiendo que el precio actual es  $Z$ , puede ser expresado como una función de la distancia ( $Z^* - Z$ ) y  $t$ .

El trabajo de Bachelier, a pesar de no haber sido recogido por la teoría económica hasta seis décadas más tarde, fue pionero en dos aspectos:

- Por un lado, estableció una “prototeoría” de mercados eficientes. Anticipándose a la HME, Bachelier definió que, en un mercado especulativo, los precios de los activos deben seguir un juego justo, es decir, una martingala, de modo que el rendimiento esperado sea cero. De acuerdo con Bachelier (1900), “la esperanza matemática del especulador es cero” (p. 30). Esto implica que “Obviamente un jugador no tendrá ni ventaja ni desventaja si la esperanza matemática es cero. Entonces diremos que el juego es *justo*” (p. 32). De manera intuitiva, asumió que los cambios en los precios deberían estar idéntica e independientemente distribuidos (i.i.d.). Esta condición i.i.d. garantiza que los precios reflejen toda la información disponible.
- Por otro lado, basándose en la distribución del precio del activo subyacente, estableció la primera fórmula conocida para la valoración de opciones europeas. Supuso que los precios de las acciones evolucionaban como en un proceso matemático muy conocido en la ciencia, llamado de Márkov, en tiempo continuo.

Debe acá mencionarse a León Walras, nacido en 1834, considerado a menudo el fundador de la economía matemática. Walras fue el primero en analizar y describir como un problema matemático el equilibrio general de la competencia perfecta para explicar cómo los precios se pueden determinar por las interacciones entre los mercados. La idea que Bachelier tenía del equilibrio en el mercado recuerda a un equilibrio walrasiano al afirmar que de “la consideración de precios verdaderos, puede decirse: en un instante dado, el mercado no cree ni en un aumento ni en una disminución de precios” (p. 31). Es decir, está proponiendo un punto de equilibrio entre precios ofertados y demandados.

En esencia, Bachelier basó su modelo de valuación de derivados en un mercado completo y eficiente. En particular, postuló que:

- Los movimientos sucesivos de precios son estadísticamente independientes.
- En un mercado de competencia perfecta, toda la información disponible es incorporada en el precio. En un mercado eficiente, también los precios recogen toda la información disponible, pero se permiten ciertas desviaciones (en la medida que sean menores a los costes de transacción). En este aspecto, un mercado eficiente podría ser definido como un mercado de competencia perfecta con costes de transacción.
- En un mercado completo, siempre hay vendedores y compradores a un determinado precio. Necesariamente tienen opiniones opuestas acerca de futuros movimientos de precios y, por lo tanto, en promedio el mercado no cree ni en una subida ni en una bajada de precios.

El trabajo de Bachelier no está exento de limitaciones, en parte, debido a la novedad del tema y, en parte, quizás, por no percibir ciertas implicaciones económicas de su modelo. Por ejemplo, Bachelier adoptó un movimiento browniano aritmético, sin caer en la cuenta de que estaba permitiendo que los precios asumieran valores negativos. Asimismo, Bachelier deduce de la ecuación [1] que la función de densidad de probabilidad es del tipo más común, llamado gaussiano. En realidad, esto no es necesariamente cierto, ya que cualquier miembro estable de la conocida familia de distribuciones estadísticas de Pareto-Lévy satisface la ecuación, siendo la distribución gaussiana sólo un caso particular de esa vasta familia. Además, Bachelier supone que la esperanza matemática del rendimiento es cero, lo cual importa indiferencia por la liquidez y neutralidad al riesgo. Contrariamente, los modelos que se desarrollaron en la segunda mitad del siglo XX suponen que el rendimiento esperado es constante, pero distinto de cero.

Esta tesis permaneció en el olvido hasta que Paul Samuelson la encontró, casi por casualidad, en la Biblioteca de la Universidad de Harvard y le dio difusión entre sus allegados. Precisamente, Samuelson fue quien formalizó la difusión de los precios en un mercado competitivo mediante un movimiento browniano geométrico y, desde entonces, se ha utilizado esta modelización como verdadera descripción de la dinámica de precios en competencia perfecta.

### EL MOVIMIENTO BROWNIANO FRACCIONAL: LOS MERCADOS TIENEN MEMORIA

Muchos de los modelos actualmente en uso se basan en este supuesto subyacente. En particular, la conocida fórmula para la valuación de opciones financieras desarrollada por Fisher Black y Myron Scholes depende de que el comportamiento de los precios siga un movimiento browniano. Otra herramienta muy utilizada en la gestión de riesgo por las empresas es el concepto de *Value at Risk* (VaR). En resumidas cuentas, lo que mide el VaR es la pérdida máxima esperada, si se produce un acontecimiento adverso. Por tanto, si detectamos que la dinámica de precios no sigue un movimiento browniano, los instrumentos mencionados dejan de ser representativos de la realidad. Precisamente, desde la econofísica se han encontrado evidencias importantes de que la dinámica de precios se desvía reiteradamente del movimiento browniano. En particular, las series de precios tienen un componente (mayor o menor) de memoria de largo plazo.

El matemático francés contemporáneo Benoît Mandelbrot observó que la serie de diferencias logarítmicas de precios diarios del algodón era más puntiaguda que una distribución gaussiana. También pudo detectar que presentaban valores extremos más frecuentes de lo que se esperaría de una distribución gaussiana, provocando colas de distribución más densas. Estas colas densas hacen que los eventos extremos (grandes caídas o grandes subidas) se presenten más frecuentemente de lo esperado en una distribución gaussiana. Estas observaciones le hicieron descartar la idea del movimiento browniano estándar y la distribución normal de la serie temporal. Como alternativa, Mandelbrot propuso, en una serie de trabajos, un proceso estocástico con memoria de largo plazo y una distribución de Pareto, generalización de la gaussiana, estable.

Su modelo se mueve en dos direcciones. En primer lugar, relaja el supuesto de varianza finita, introduciendo el llamado “efecto Noé”, o de aluvión, en que las cotizaciones pegan saltos bruscos sin pasar por estadios intermedios, lo que permite variaciones muy bruscas y genera una suerte de discontinuidad en la serie. En segundo lugar, relaja la hipótesis de independencia, dando lugar al “efecto José”.

El “efecto José” de Mandelbrot, hace referencia al relato bíblico en el que José vaticinó (interpretando el sueño del faraón) que los habitantes de Egipto sufrirían siete años de abundancia y luego siete años de miseria. Con ello, Mandelbrot intentó destacar la propiedad de algunas series temporales, que exhiben más persistencia de lo esperado en una serie absolutamente aleatoria, pero sin mostrar una dependencia de corto plazo (que se denomina markoviana) significativa. Esta persistencia es recogida por el llamado movimiento browniano fraccional, que exhibe memoria de largo plazo, mientras que el browniano original no tiene memoria.

En este nuevo modelo, las variables aleatorias no están descorrelacionadas y, por tanto, en lugar de describir lo que se llama un “ruido blanco” (que quiere decir, precisamente, que no hay correlaciones), describen un “ruido coloreado”. La influencia de Mandelbrot en la econofísica es muy importante, ya que abrió un campo de investigación que no se limita a los economistas sino a muy diversas disciplinas. Por otra parte, su modelo trazó un puente entre el desarrollo de modelos teóricos y su verificación empírica.

## LA HIPÓTESIS DEL MERCADO EFICIENTE EN EL SIGLO XXI

Podemos decir que, hasta la década de 1980, la Hipótesis del Mercado Eficiente (y su correspondiente modelización como movimiento browniano estándar) estaba casi incuestionada (a excepción de trabajos como los de Mandelbrot).

Sin embargo, en esos años comienzan a aparecer estudios empíricos que encuentran con frecuencia una incompatibilidad entre la teoría y las observaciones. Poco a poco, se comienza a poner en cuestión el paradigma dominante de comportamiento racional y ausencia de memoria en los precios financieros. Esto dio pie a que personas provenientes de otras disciplinas, en particular, físicos, comenzaran a analizar los datos e intentaran formular modelos más genéricos y universales que pudieran incluir distintos tipos de mercados.

El prestigioso econofísico J. Doyne Farmer afirma que una de las tendencias más prometedoras en la investigación financiera de hoy es la modelización del mercado desde una perspectiva biológica, concretamente, dentro de un entorno evolutivo donde mercados, instrumentos e inversores interactúan y evolucionan dinámicamente de acuerdo a una regla de selección económica. Desde esta perspectiva, los agentes compiten y se adaptan, pero no necesariamente en forma óptima, lo que permite que los precios no se comporten de un modo completamente aleatorio.

Los modelos que incluyen variables psicológicas, como las propuestas de Daniel Kahneman, focalizan su interés en el modo en que la psicología humana influye en el proceso de toma de decisiones, permitiendo desvíos del comportamiento racional. Junto con los modelos basados en el agente (*agent-based models*) pueden aportar una nueva vía de investigación. Estos modelos intentan capturar el proceso de aprendizaje y las dinámicas de los mercados financieros utilizando estructuras más realistas. Si bien los modelos evolutivos todavía se encuentran en sus inicios, permiten inferir que las estrategias de los agentes evolucionan y, a medida que evolucionan, los mercados se vuelven más eficientes.

La aplicación de la metáfora evolutiva no es nueva en economía. Mencionemos así las teorías de Joseph Schumpeter, ministro de Finanzas en Austria (1919-1920) y profesor de Harvard desde 1932 hasta su muerte en 1950. Schumpeter habla de los ciclos económicos, la innovación y la destrucción creativa, lo que tiene un aire evolucionista. La idea central de la perspectiva evolutiva es que los individuos no maximizan una utilidad esperada, sino que maximizan la supervivencia de su material genético. El comportamiento de los individuos depende del entorno en que se muevan. Esta teoría evolutiva también se hace eco de la idea de racionalidad limitada desarrollada por Herbert A. Simon a mediados del siglo XX. Es cuestión de reeditar esta metáfora evolutiva para incluirla en los modelos. Destacamos que a Simon, en 1978, le fue concedido el premio Nobel de Economía por ser uno de los investigadores más importantes en el terreno interdisciplinario y porque su trabajo ha contribuido a racionalizar el proceso de toma de decisiones.

El *crack* bursátil de 1987, la burbuja de las *dotcom* de los años noventa (y la posterior explosión de la burbuja), así como la más reciente expansión del mercado bursátil e inmobiliario que culminó en la crisis llamada *subprime*, son ejemplos de valuaciones del mercado que se alejaron en forma consistente de sus valores fundamentales. Estos fallos explicativos de la Hipótesis del Mercado Eficiente han minado, en cierto modo, su credibilidad.

En estos años, los físicos también han contribuido, en colaboración con economistas, al desarrollo de modelos de los mercados más realistas. Es un hecho indiscutido que los extremos de las distribuciones de probabilidad de los rendimientos de acciones y bonos no siguen una distribución gaussiana y, tal como anticipó Mandelbrot, tienen una densidad de probabilidad mayor. Esto ocurre también en determinados fenómenos naturales. Por otro lado, la modelización ecológica de los mercados, mediante la interacción de agentes adaptativos, puede aportar un efecto dinámico a las relaciones económicas.

Un hallazgo significativo en econofísica se refiere a la importancia de las características cualitativas de los mercados, como por ejemplo, que un factor determinante de la dinámica del mercado es la diversidad de comportamientos estratégicos de los agentes. Los mercados funcionan bastante bien si los participantes actúan utilizando muchas estrategias diversas, pero el funcionamiento se distorsiona si muchos participantes usan pocas estrategias o las replican. Hay un punto en el que la cantidad de agentes que están usando un mismo conjunto limitado de estrategias se convierte en crítico y genera una transición abrupta de fase que culmina en una crisis. Hoy en día, las estrate-

gias de *trading* de los grandes bancos se realizan de manera automática. Una computadora lleva a cabo unos determinados algoritmos (que por cuestiones de tiempo computacionales son sencillos y poco variados) y emite una señal de compra o de venta que se transmite automáticamente al mercado vía internet. Si muchos agentes utilizan los mismos algoritmos, las señales de compra o venta amplifican la variación y terminan colapsando el mercado, convirtiendo la crisis en una profecía auto-cumplida.

Otro aporte reciente desde la física ha sido el estudio de los mercados financieros utilizando la llamada teoría de redes. Esta técnica ha ayudado a explicar ciertas fuentes de inestabilidad de los mercados. De acuerdo con la teoría financiera estándar, la distribución de los riesgos entre las instituciones financieras, a través de instrumentos financieros derivados o mediante diversificación, hace que cada empresa y, por extensión, el conjunto del mercado sea más seguro y estable. Sin embargo, una red sobre-conectada puede hacer más fácil la propagación de una crisis. Esto es lo que, en cierto modo, sucedió con la crisis global del 2007-2008. Tenemos un sistema financiero global muy interconectado, con gran facilidad para el movimiento de capitales. Al no tener ningún “compartimiento estanco”, la crisis se propagó de inmediato. Casi todos los bancos del mundo, en forma directa o indirecta, tenían algún activo tóxico procedente de las hipotecas *subprime*. Paradójicamente, los países que salieron más indemnes de la crisis financiera fueron aquellos con un sistema financiero menos desarrollado: la carencia de conexión con las finanzas globales fueron su escudo ante la crisis.

Dado que la teoría económica dominante fue concebida desde la óptica de la mecánica newtoniana, sus modelos se basan en el supuesto de que el sistema está en equilibrio. Este equilibrio solo es afectado por perturbaciones exógenas: un *shock* en el precio del petróleo o un nuevo invento que mejora la eficiencia, por ejemplo. En cambio, si introducimos como variables endógenas de los modelos las innovaciones o los shocks, queda claro que la propia fuente de inestabilidad está dentro del modelo. Es decir, la inestabilidad es inherente al sistema económico, donde el equilibrio es solo un estado momentáneo. Así como en la física se desarrolla toda una rama dedicada a la mecánica estadística del no equilibrio (*nonequilibrium statistical mechanics*), podría ser un buen punto de partida pensar los sistemas económicos desde el desequilibrio e ir más allá de la mecánica clásica. Así como hay sistemas físicos a los cuales una pequeña perturbación lo conduce cada vez más lejos del equilibrio, deberíamos estudiar esos puntos de criticalidad que hacen que un sistema económico aparentemente estable colapse en un período relativamente corto de tiempo.

Por lo tanto, si bien la investigación en finanzas ha avanzado bastante, creemos que la aportación de la econofísica puede plantear un punto de vista alternativo para pensar sobre el modo de formación de los precios en un mercado. Sería deseable avanzar hacia un cuerpo teórico alternativo que pueda incluir los comportamientos de los mercados que hoy vemos como anómalos. Existen muchas metodologías y modelos que han sido probados con éxito en sistemas físicos y que podrían ayudarnos a comprender un cierto comportamiento universal de variables económicas. La modelización de sistemas complejos dinámicos, considerando la heterogeneidad de los agentes económicos, puede ayudarnos a comprender mejor el denso entramado que conforman las decisiones económicas. Los conceptos de criticalidad y de desequilibrio deberían centrar la investigación económica. Deberíamos ir hacia modelos universales, pero a la vez realistas, de nuestros mercados. Estas son algunas de las direcciones que parecen cobrar fuerza en la investigación econofísica, aunque aún queda mucho por hacer.

## REFERENCIAS

1. Un TB contiene un millón de millones de *bytes*. Un *byte* es la unidad usual de información.
2. El gran economista londinense David Ricardo, nacido en 1772, es fundador de la corriente de pensamiento llamada clásica, junto a Adam Smith y Thomas Maltus.
3. El número esperado de individuos que supere al mercado en cada uno de los diez años será  $2000 \cdot 2^{-10} = 1,95$ . Es más, la probabilidad de que ningún individuo supere al mercado en alguno de los diez años es  $(1-2^{-10})^{2000} = 0,1416$ .

## REFERENCIAS

- Bachelier, L. (1900). *Théorie de la spéculation*. *Annales scientifiques de l'Ecole Normale Supérieure*, París.
- Cootner, P. H. (1964). *The Random Character of Stock Market Prices*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Farmer, J. D. y Geanakoplos, J. (2008). "The Virtues and Vices of Equilibrium and the Future of Financial Economics". *Cowles Foundation Discussion Paper*, N.º 1647. New Haven, Connecticut: Yale University.
- Farmer, J. D. y Lo, A. W. (1999). "Frontiers of Finance: Evolution and Efficient Markets". *Proceedings of the National Academy of Science*, 96(18), pp. 9991-9992.
- Friedman, M. (1958). "La metodología de la economía positiva". *Revista de economía política*, 21, pp. 355-397. Recuperado de <http://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/2496353.pdf>
- Mandelbrot, B. B. y Hudson, R. L. (2004). *The (Mis)behaviour of Markets: a Fractal View of Risk, Ruin and Reward*. New York: Basic Books.

Aurelio Fernández Bariviera es doctor en Economía por la Universidad Rovira i Virgili (España). Ha realizado estudios de posgrado en Economía y Política de la Unión Europea en la Universidad de Padua (Italia). Ha sido asistente de investigación en SRI International (antiguamente Stanford Research Institute) y auxiliar docente en la Universidad Nacional de La Plata. Actualmente, es profesor en la Facultad de Economía y Empresa de la Universidad Rovira i Virgili. Sus actividades de investigación se centran en finanzas cuantitativas, econofísica, teoría de la información, teoría del caos, sistemas dinámicos y sus aplicaciones a diversos campos de la economía.