

Econofísica

por

Ana María Contreras y Hernán Larralde

Este es un capítulo separado que integra el libro

Fronteras de la Física en el Siglo XXI

Octavio Miramontes y Karen Volke (Editores)

CopIt-arXives, 2013

México, D.F.

ISBN: 978-1-938128-03-5

©CopIt-arXives

<http://scifunam.fisica.unam.mx/mir/copit/TS0011ES/TS0011ES.html>

Índice general

| | | |
|------------------------------------|---|----------|
| Ana M. Contreras y Hernán Larralde | Econofísica | 1 |
| 1. | ¿De qué se trata la Economía? | 1 |
| 2. | Los puentes entre la Física y la Economía | 5 |
| 3. | ¿Qué estudia la Econofísica? | 7 |
| | Finanzas cuantitativas | 7 |
| | Teoría de juegos y el juego de minorías | 11 |
| | ¡Y mucho más! | 13 |
| 4. | Referencias | 15 |

Econofísica

Ana M. Contreras y Hernán Larralde, Instituto de Ciencias Físicas, UNAM, México

1. ¿De qué se trata la Economía?

Todos hemos oído hablar de las crisis económicas, leemos noticias que informan sobre indicadores económicos como la inflación y el desempleo; sabemos que los precios de los productos están relacionados con la oferta y demanda, hemos oído hablar del neoliberalismo, de caídas de mercados, de futuros, opciones y portafolios financieros, pero pocos sabemos, bien a bien, de qué se trata la economía. Menos, todavía, sabemos que muchas herramientas y enfoques propios de la física hallan aplicaciones en el estudio y descripción de sistemas económicos y financieros. Ése es el tema que abarcaremos en el presente capítulo¹.

En términos generales, la economía estudia cómo las personas asignan e intercambian recursos y qué consecuencias tienen estas acciones sobre las decisiones y acciones de otras personas. A grandes rasgos, la economía se divide en las siguientes áreas:

1. Microeconomía: Es la rama de la economía en donde se estudian las decisiones de asignación e intercambio de recursos a nivel de agentes individuales y/o firmas. Por ejemplo, la determinación de precios de bienes de intercambio, la ubicación de negocios, las estrategias de competencia entre firmas, entre muchos otros.
2. Macroeconomía: Se refiere a la descripción agregada de las actividades económicas. Por ejemplo, la productividad y el consumo por sectores en una sociedad, en una región o en todo el país. En esta área caen los estudios sobre la inflación, recesión, producto interno bruto, empleo, etcétera.
3. Finanzas: Se relaciona con las decisiones de asignación de recursos en el tiempo bajo condiciones de riesgo (incertidumbre). En particular podemos mencionar la descripción de las actividades que se desarrollan en los mercados donde se compran y venden instrumentos financieros como acciones y bonos; instrumentos derivados

¹ Véase también "Física y Sociedad" de Gerardo García Naumis, en este mismo volumen.

como opciones, futuros y *swaps*; o los mercados de divisas. Pero también abarca otras áreas, como las finanzas personales, donde las decisiones de asignación de bienes en el tiempo determinan, por ejemplo, los fondos de retiro, las inversiones familiares, etcétera.

De lo anterior es evidente que el campo de estudio de la economía es extremadamente amplio, y de profundas repercusiones en todos los ámbitos del quehacer humano. Esto hace realmente sorprendente el hecho de que el grueso de la economía se base en una hipótesis fundamental: Las decisiones de los participantes en todo sistema económico se toman de manera “racional”. Específicamente, cada agente toma sus decisiones buscando maximizar su “felicidad” (utilidad) [1]. Tal vez vale la pena enfatizar que esta hipótesis no hace referencia a qué es lo que hace feliz a cada persona, después de todo, “sobre gustos no hay nada escrito”, sólo afirma que los agentes buscan maximizar aquello que los hace feliz, cualquier cosa que esto sea.

Evidentemente, esta hipótesis es solo una aproximación al comportamiento real de las personas, pero suena plausible que en general, sí represente bastante bien el comportamiento “típico” de los actores en la economía. A partir de esta hipótesis, por ejemplo, se puede predecir el efecto que tienen los impuestos sobre el precio y volumen de ventas de un producto, o que los mercados equilibran en un estado “óptimo” para todos los participantes [2].

En finanzas, donde se incorpora la variable temporal al proceso de decisión, además de la hipótesis de agentes racionales, se hace frecuentemente otra hipótesis: que los mercados son “eficientes”. Esto significa que se supone que toda la información sobre un producto que pueda proveer la oportunidad de obtener una ganancia sin riesgo, incentiva acciones que “inmediatamente” modifican el precio del producto, cancelando esa oportunidad. Esto significa que los precios cambian reflejando en cada instante toda la información disponible. De manera muy explícita: esta hipótesis significa que los precios son procesos Markovianos, cuyos cambios son independientes de la historia.

Indudablemente, los alcances e innumerables éxitos de los modelos económicos son extraordinarios. Sin embargo, es claro que todavía existen problemas por resolver, como es evidente a la vista de las frecuentes crisis económicas que nos preocupan y afectan a todos. Esto hace importante identificar y entender qué es lo que ha fallado, o qué es necesario implementar en los modelos económicos para, idealmente, evitar estas crisis, o en su defecto, predecirlas y dar los pasos para resolverlas eficientemente.

Además, no sólo se ha fallado en lograr predecir y evitar las crisis financieras, también se ha fallado en la predicción del impacto que las crisis tienen tanto a escala local como a escala global. Esto es debido a que los modelos económicos frecuentemente no contemplan la existencia siquiera de los eventos que desatan las crisis.

Un ejemplo donde esta omisión es patente, es la fórmula de Black-Scholes, a la que han culpado de estar relacionada con las recientes crisis bancarias [3]. Dicha fórmula sirve para ponerle precio a las *opciones*, que son instrumentos financieros (derivados) usados

por firmas para intentar “cubrirse” (disminuir riesgos). Las opciones son contratos que otorgan la opción de comprar o vender determinado producto a un precio preestablecido en un tiempo dado [4]. Esta ecuación fue presentada por primera vez por Fischer Black y Myron Scholes en 1973 [5], y fue desarrollada y justificada matemáticamente por Robert C. Merton, mereciendo el Premio Nobel de Economía en 1997. Como en todo modelo económico, en su derivación se hicieron las hipótesis usuales que, como mencionamos arriba, a primera vista parecen razonables: se eliminó la oportunidad de arbitraje, es decir, la oportunidad de poder aprovechar diferencias de precios entre mercados para obtener ganancias; se asumió una tasa de interés libre de riesgo constante y no se tomaron en cuenta costos de transacción. Sin embargo, la simplificación con consecuencias más importantes fue la de asumir que el precio del producto que está en juego en el contrato, sigue un movimiento Browniano geométrico (como el de la figura 1), con arrastre y volatilidad constante [6]. En otras palabras, esto significa que el modelo asume que el logaritmo del cambio de precio está descrito por una distribución gaussiana, y por lo tanto, que la ocurrencia de eventos extremos, como ocurre en una crisis, es prácticamente despreciable.

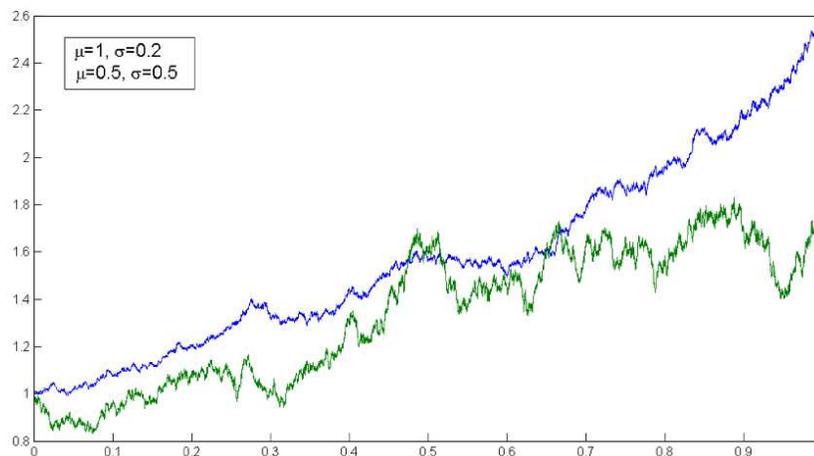


Figura 1: Muestras de caminatas aleatorias que siguen un movimiento Browniano geométrico. Para distinguir el efecto de las variables estamos mostrando la posición contra el tiempo de una caminata con mayor arrastre μ en azul, y en verde con una mayor desviación estándar (o volatilidad) σ .

Pero las crisis económicas sí ocurren. Por ejemplo, el 19 de Octubre de 1987, en el llamado *Black Monday*, el mercado financiero mundial perdió más del 20% de su valor en unas cuantas horas (ver la figura 2). Un evento de este tipo era esencialmente imposible bajo las condiciones del modelo. Otra situación en donde se omitió la posibilidad de que ocurriera un evento raro ocurrió en la crisis del 2008, desatada por el colapso de

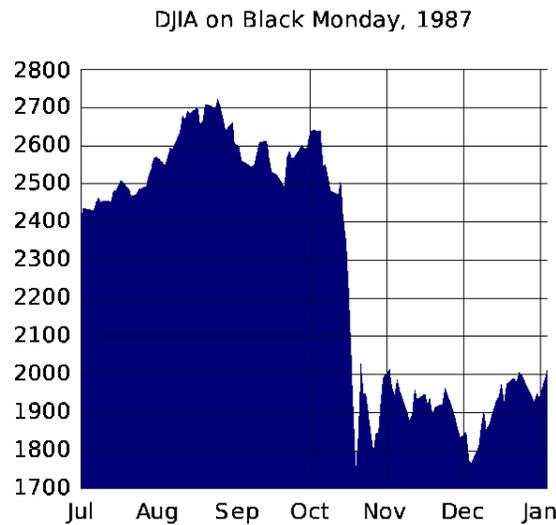


Figura 2: Caída del índice Dow Jones Industrial Average, en 1987, cuando los mercados mundiales se desplomaron en un día conocido como *Black Monday*.

la “burbuja” inmobiliaria. Esta crisis parece haberse desencadenado tras el desarrollo de un producto financiero para el cual subestimaron la probabilidad de que, de manera simultánea, muchos prestatarios no pagaran sus deudas [7], y eso fue justamente lo que ocurrió.

Evidentemente los economistas se han dado cuenta de que los supuestos sobre los que descansa la teoría económica podrían no ser del todo correctos. De hecho, economistas tan reconocidos como Paul Krugman y Joseph Stiglitz, ambos premios Nobel de Economía y activos participantes tanto en críticas como en soluciones económicas, han expresado su descontento con algunas de las bases teóricas de la economía [8, 9].

De hecho, en mayor o menor grado, todos los supuestos fundamentales de la economía han sido cuestionados. Por ejemplo, se ha puesto en duda la hipótesis de agentes racionales. De hecho, hay evidencia de que en ocasiones efectivamente sí se toman decisiones de forma “irracional”; decisiones más orientadas por la aversión al riesgo que por la búsqueda de máxima utilidad, y otras decisiones tomadas siguiendo un comportamiento gregario (por presión social y *herding*), como en la caricatura de la figura 3. Identificar hasta qué grado se toman decisiones gregarias es importante para tratar de entender ciertos eventos en el mercado financiero [10], en el que también se han hecho análisis empíricos [11], ya que podrían dar lugar a una “irracionalidad colectiva”, a pánicos y a grandes colapsos financieros [12].

Otros posibles defectos en los fundamentos de la economía son, por un lado, el enfoque del “agente representativo”, el cual ignora la diversidad en el mundo real y modela la

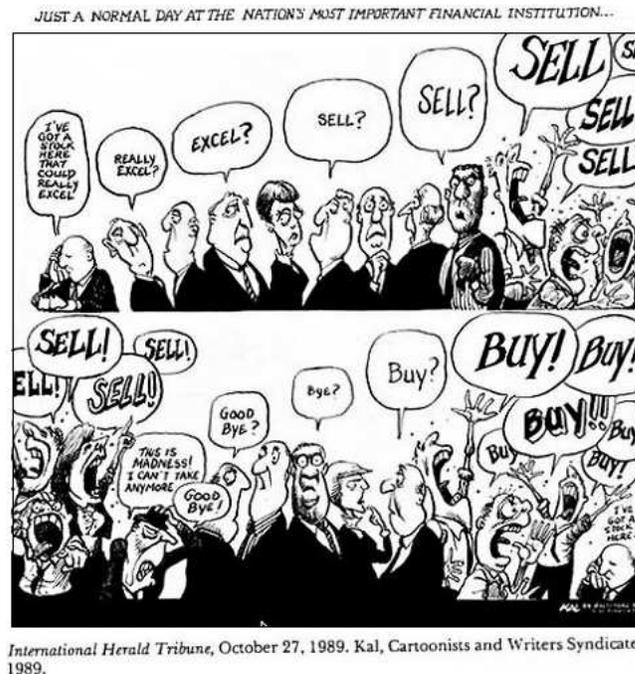


Figura 3: Caricatura ya clásica de Kal (1989), que ilustra el comportamiento gregario y la irracionalidad de agentes en la sala de operaciones bursátiles.

economía como si el mundo estuviese poblado por agentes y firmas “promedio”; en vez de contemplar que puede haber diferentes intereses y capacidades en juego, y por lo tanto una diversidad de objetivos y estrategias actuando simultáneamente [9]. Por otro lado, también se ha cuestionado la hipótesis de que los mercados son estables, eficientes y auto-regulados por naturaleza [13], cuando parece evidente que el estado en que se encuentran frecuentemente, difícilmente podría identificarse como un estado de equilibrio.

2. Los puentes entre la Física y la Economía

Habiendo discutido a muy grandes rasgos de lo que se trata la economía, en qué se basa y cuáles son sus puntos débiles, tal vez sea más fácil darnos cuenta en qué pueden contribuir otras áreas de la ciencia, en especial la física.

El interés de los físicos en economía en general, y sobre todo en tratar de entender y describir los mercados financieros, despegó con la disponibilidad de enormes cantidades de datos financieros en los 80's; cuando muchos físicos y matemáticos fueron contratados en *Wall Street* para analizar el mercado.

Más tarde, en los años 90's, con el motivo de archivar los artículos de físicos en dicho

campo, H. E. Stanley [14] denomina con el nombre de “Econofísica” a esta área multidisciplinaria que intenta combinar física, economía, matemáticas y finanzas. Sin embargo, la conexión entre economía y física es muy vieja, y los caminos de ambas disciplinas se han cruzado en varias ocasiones [7]. Por ejemplo fue Daniel Bernoulli, el descubridor del principio de Bernoulli en hidrodinámica, quien introduce el concepto de “utilidad” para describir las preferencias de la gente. De manera contrapuesta, a los economistas les gusta hacer notar que en el contexto de finanzas, Louis Bachelier resolvió el problema matemático del movimiento Browniano antes que Einstein. Específicamente, Bachelier, desarrolló un modelo de caminata aleatoria para describir la dinámica de los precios [15]. Si bien el trabajo de Bachelier parece haber pasado desapercibido hasta muchos años más tarde que resurgió el modelo de caminata aleatoria en relación con la hipótesis de mercados eficientes, esta línea de modelación desemboca en la fórmula de Black y Scholes, que como habíamos mencionado, permite asignar un precio, y por lo tanto abrir el mercado de las opciones. La contraparte física, el movimiento browniano, y su corroboración experimental, que también mereció un Premio Nobel, terminaron de disipar las dudas respecto a la naturaleza molecular de la materia.

De hecho, la física estadística tradicionalmente busca ser el puente entre la física microscópica y la fenomenología macroscópica. Esta disciplina trasciende la suposición, a la postre errónea, de que la materia está formada por moléculas sujetas a las mismas leyes de la física que todos los demás cuerpos. La descripción estadística de la naturaleza incorpora procesos estocásticos, como el término de ruido de la ecuación de Langevin para describir movimiento Browniano, que buscan representar el complejísimo y fundamentalmente impredecible efecto de las innumerables interacciones a las que cada partícula está sujeta. En principio, este enfoque es capaz de extenderse más allá de los sistemas en equilibrio y puede abarcar la descripción de la cinética de sistemas caracterizados por tener elementos impredecibles, prácticamente indistinguibles del azar. Este camino culmina en lo que actualmente se denomina sistemas complejos.

Desde la perspectiva de la física se ha podido avanzar en el entendimiento de este tipo de sistemas, denominados complejos, en los que, entre otras cosas, pequeñas perturbaciones pueden llevar a efectos enormes, y donde los estados que alcanza el sistema emergen de fenómenos colectivos entre los componentes. Este tipo de sistemas frecuentemente presentan eventos extremos, que eventualmente podrían explicar tanto los temblores/terremotos [16] como las crisis mundiales [17]. En efecto, la dinámica de los sistemas económicos surge de la actividad de agentes, en ocasiones un gran número de ellos, cuyas decisiones afectan las opciones y perspectivas de otros agentes, todos con incentivos y objetivos más o menos heterogéneos. Sistemas de este tipo tienen los ingredientes y exhiben las propiedades de los sistemas complejos, y por lo tanto, las herramientas de la física estadística, procesos estocásticos y dinámica no lineal pueden ser de mucha utilidad para su análisis.

3. ¿Qué estudia la Econofísica?

Son varios los temas que están incluidos dentro del campo de la Econofísica, y éstos abarcan problemas tanto de macro y micro-economía como de finanzas. En algunos de estos temas, al igual que en la física estadística, el objetivo principal es tratar de extraer y entender las propiedades de los fenómenos económicos a partir de la dinámica microscópica de los agentes que participan, en otros temas se busca hacer una caracterización precisa del fenómeno en cuestión. En lo que resta del capítulo discutiremos los elementos de algunos de los temas más activos del campo, y mencionaremos otros que pueden ser relevantes en el futuro. Pero, sin lugar a dudas, de todos los temas que hasta la fecha han sido estudiados desde la perspectiva de la econofísica, el más popular es el relacionado con el análisis de los mercados financieros. Con este tema empezaremos.

Finanzas cuantitativas

Caracterización estadística de los cambios en precios de activos financieros

Aprovechando la enorme cantidad de información que proviene de la compra y venta de acciones en los varios mercados del mundo diariamente, especialmente ahora que es posible disponer de los precios y volúmenes de transacciones que ocurren en los mercados financieros en escalas de milisegundos [18], algunos físicos, con la experiencia adquirida analizando datos en procesos estocásticos y diversos sistemas complejos, han buscado contribuir en este tema.

La secuencia de precios de determinada acción (u otro instrumento financiero) que se almacena se conoce como una *serie de tiempo*, y su análisis busca identificar tendencias, e idealmente, hacer predicciones de su comportamiento al futuro. El enfoque típico consiste en tratar de encontrar el modelo que mejor reproduzca las propiedades estadísticas empíricas, entre éstas destacan los llamados *hechos estilizados*.

Los hechos estilizados son regularidades cualitativas que se observan esencialmente para cualquier acción, en cualquier mercado, en (casi) cualquier escala temporal. Entre ellas podemos mencionar:

1. Las distribuciones de cola ancha de los cambios relativos en los precios (*returns*): Si denotamos p_t al precio de un instrumento financiero al tiempo t . El cambio relativo en un intervalo de tiempo τ estará dado por:

$$r_\tau(t) = \frac{p(t + \tau) - p(t)}{p(t)} \approx \log(p(t + \tau)) - \log(p(t)); \quad (1)$$

Empíricamente se observa que la distribución de esta cantidad no es una distribución gaussiana, sino que está caracterizada por tener una cola que decae más lentamente que una exponencial [19]. En la actualidad, muchos estudios empíricos con diferentes series de datos [20] que corroboran esta observación se pueden encontrar

en la literatura. A pesar de ser éste uno de los hechos estilizados mejor establecidos, aún existen varias propuestas para la forma de la distribución del cambio de precios, como distribuciones de Lévy por Rosario Mantegna y H. E. Stanley [21] u otras distribuciones con leyes de potencia [22].

2. Los cambios relativos en los precios tiene autocorrelación cero: La función autocorrelación está definida como:

$$\rho(T) = \langle r_\tau(t+T)r_\tau(t) \rangle - \langle r_\tau \rangle^2. \quad (2)$$

Hay amplia evidencia de que la autocorrelación entre los valores de los cambios en los precios decae rápidamente a cero, de manera que el precio es, efectivamente, un proceso Markoviano, en concordancia con la hipótesis de mercados eficientes.

3. Agrupación de la volatilidad: Este hecho se refiere a la observación de que el valor absoluto, o el cuadrado de los cambios de precios, sí parecen estar correlacionados en el tiempo; y dicha función decae lentamente. Esto apunta a que los cambios de precios no están idénticamente distribuidos a lo largo del tiempo, y que grandes cambios en los precios tienden a ser seguidos por cambios grandes durante un intervalo de tiempo.
4. Normalidad de agregación: Esto significa que cuando uno incrementa la escala de tiempo para el análisis de datos (por ejemplo la τ en el cambio de precio), las distribuciones se acercan más a la forma gaussiana. Esto es, la forma de la distribución depende de la escala de tiempo [20].

Para una revisión completa de este tipo trabajos, desde el punto de vista de la física estadística, el libro de Bouchaud [23] es una opción excelente. Además de las propiedades arriba mencionadas, otras características como la correlación entre volumen y volatilidad (la desviación estándar del cambio relativo de precios), el escalamiento y el exponente de Hurst han sido estudiados en los datos financieros [24].

Modelos teóricos de mercados financieros: El libro de órdenes

Como hemos mencionado con anterioridad, en la construcción de modelos de mercados financieros hay aspectos que habían sido soslayados, entre éstos destaca la presencia de distribuciones de cambios de precio con colas largas, que implica la posibilidad de eventos raros. Esto significa que los mercados pueden presentar grandes fluctuaciones y son susceptibles de tener caídas catastróficas [25, 26]. Además, los modelos deben de reproducir los hechos estilizados que caracterizan a los mercados. Una posibilidad interesante sería que estos aspectos surgieran a partir de la descripción adecuada de los eventos elementales del mercado, es decir, los procesos a través de los cuales se compran y venden los instrumentos financieros: El libro de órdenes.

En la actualidad, la mayoría de las acciones en mercados importantes como London Stock Exchange, Paris Bourse, DAX, etcétera; son vendidas y compradas electrónicamente a través de un sistema de doble subasta, en el cual los participantes muestran públicamente sus intenciones de vender y/o comprar, el volumen y precio que están dispuestos a pagar o al que están dispuestos a vender. Estas ofertas y demandas son almacenadas en un “Libro de órdenes” central. Hoy en día en que las órdenes son electrónicas, es posible llevar registro de la aparición y ejecución de órdenes en intervalos de hasta milisegundos. En la Fig 4, mostramos las mejores ofertas de compra y venta para las acciones de Bayer AG, como sucedían a intervalos de dos segundos un día de diciembre del 2011. Los datos fueron grabados de Xetra, el sistema electrónico de la bolsa alemana (DAX).

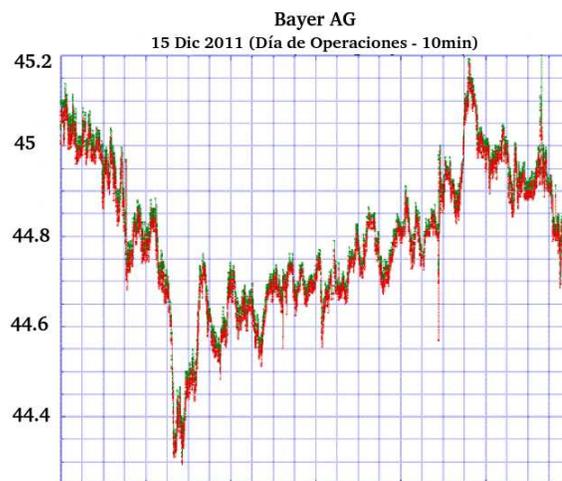


Figura 4: Precio (en euros) de Bayer AG contra tiempo, durante un día de operaciones (8-16:30 horas). El precio de la mejor oferta de compra (verde) y venta (rojo) se registra cada dos segundos. La diferencia entre estos valores se llama “*spread*”.

Las órdenes se pueden diferenciar entre “*limit orders*”, que son los pedidos de compra o venta que se registran a un precio específico y que quedan en “cola” hasta que otro participante acepta hacer la transacción al precio propuesto; y los “*market orders*” que son las órdenes de compra o venta al mejor precio disponible en el libro de órdenes en ese momento, dando lugar a una transacción inmediata.

Para tener más clara la dinámica del libro de órdenes, en la figura 5 (tomada de [27]) se pueden observar todas las órdenes de compra y venta (*asks* y *bids*) durante un día del año 2001 para las acciones de GlaxoSmithKline (del London Stock Exchange). El precio instantáneo de la acción, es decir, el precio al que ocurren las transacciones, corresponde al de las “mejores” órdenes en ese momento. Las demás órdenes se quedan en fila, en espera de que el precio al que se ejecutan las compra/ventas las alcance. La variación en el tono de rojo (compras) y azul (ventas), representa el volumen de las transacciones

propuestas a cada precio.

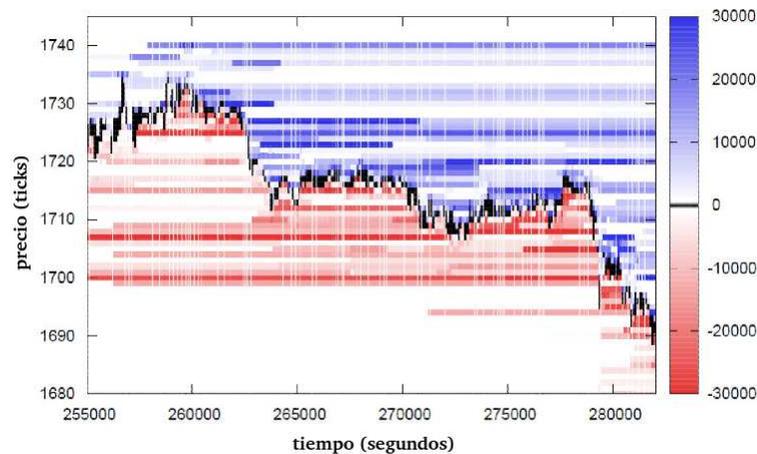


Figura 5: Libro de órdenes para GlaxoSmithKline (GSK) durante un día de operaciones bursátiles del 2001 (escala temporal en segundos). En negro se muestra el *spread*, en rojo todos las *limit orders* de compra (a mayor tonalidad de rojo, mayor volumen de compra), y en azul el equivalente para las *limit orders* de venta. Figura tomada de la referencia [27].

Han habido varios intentos para modelar el libro de órdenes, buscando reproducir estadísticamente los datos empíricos disponibles y los hechos estilizados que los datos reales satisfacen. Entre las variables que juegan un papel importante en este proceso están el flujo de órdenes, los tiempos de llegada de las órdenes, el volumen de los pedidos, el perfil del libro de órdenes, entre otras. Una revisión de las estadísticas más interesantes del libro de órdenes se puede encontrar en Ref [28]. Entre los principales resultados empíricos sobre el comportamiento del libro de órdenes podríamos mencionar los siguientes: la distribución del volumen de las órdenes decae con una ley de potencias con exponente $1 + \mu \sim 2$ [29]; las órdenes se colocan en una distribución amplia alrededor del precio instantáneo de transacción, caracterizada por un exponente que varía de un mercado a otro ($1 + \mu \sim 1.6$ para la Bolsa de París, ~ 2 para la de Nueva York y ~ 2.5 para Londres); y las órdenes son canceladas con una distribución de tiempos de espera con ley de potencia con exponente $1 + \mu \sim 2.1$ y ejecutadas con exponente $1 + \mu \sim 1.5$ [18].

Entre las contribuciones pioneras para modelar el libro de órdenes figura el modelo de Bak [30], que está basado en la idea de creación y aniquilación de partículas: $A + B \rightarrow 0$. En este modelo, los precios de compra y venta son vistos como partículas que se mueven difusivamente y se aniquilan al encontrarse (que representa una transacción). Conforme las partículas son eliminadas es necesario introducir más partículas al sistema para conservar la concentración. Este trabajo es muy importante por su papel seminal y porque se pueden obtener muchos resultados de manera analítica. Sin embargo, no es un modelo realista; en particular, no hay ningún motivo para pensar que los precios propuestos en

las órdenes se muevan de manera difusiva. Otros resultados importantes aparecen en el trabajo de Stigler [31], quien llevó a cabo las primeras simulaciones del libro de órdenes, y en cuyo algoritmo los pedidos se generaban aleatoriamente, y quedaban en “cola”, esperando hasta que otra orden los igualara, y entonces se eliminaban. Más tarde, Maslov [32] introdujo las órdenes de mercado, las cuales se ejecutan inmediatamente al mejor precio disponible en ese momento, y lo cancelan. Posteriormente Challet y Stinchcombe [33] incluyen la posibilidad de cancelar órdenes, para completar un modelo más realista del libro. Sin embargo, ninguno de estos modelos ha ajustado los resultados empíricos satisfactoriamente [34].

Los trabajos mencionados son los más clásicos, pero muchos más pueden encontrarse en la literatura de estos dos últimos años [35–40]. Una compilación reciente de los trabajos relacionados en el tema puede encontrarse en [41].

Matrices de correlación y correlaciones cruzadas

Otro tema en que el que la caracterización estadística del comportamiento de las series de tiempo financieras es de suma importancia es en la construcción de “portafolios”. Los portafolios son combinaciones de instrumentos con los que se busca disminuir el riesgo de inversión, esto es, se busca “cubrir” contra la posibilidad de pérdidas. Para lograrlo se requiere identificar instrumentos que varíen en direcciones opuestas uno del otro. En este sentido, en vez de las correlaciones temporales, que de todas maneras se supone que no existen en los mercados eficientes, para la construcción de portafolios hay que considerar las correlaciones (o anticorrelaciones) entre distintos instrumentos. Una herramienta que puede indicar la existencia de codependencia entre instrumentos financieros, así como develar la existencia de sutiles relaciones temporales en el historial de precios de cada instrumento, surge no de los métodos de la física estadística, sino del ámbito de la mecánica cuántica. Allí se observó que las propiedades de los espectros de sistemas clásicamente caóticos eran similares a los espectros de eigenvalores de matrices cuyas entradas eran variables aleatorias. Estas propiedades difieren dependiendo de cómo se escogen las variables, así como de las propiedades de simetría de la matriz. Estos resultados se pueden comparar, por ejemplo, con la matriz de covarianza de un instrumento, o la matriz de correlación cruzada entre instrumentos distintos [42].

Teoría de juegos y el juego de minorías

Para estudiar el proceso detallado de la toma de decisiones, sobre todo cuando las decisiones que se toman afectan a otros participantes del sistema, se puede recurrir a la teoría de juegos. De hecho, la teoría de juegos tiene su impulso inicial precisamente en referencia a sus aplicaciones económicas con el libro “Theory of Games and Economic Behavior” por John von Neumann y Oskar Morgenstern [43]. En esta área, un problema que ha sido extensamente estudiado desde la perspectiva de la física es el que se conoce como “Juego

de minorías". Este juego busca capturar, de manera simplificada, el proceso de decisión en un mercado financiero, en donde, por lo general, las decisiones *correctas* dependen de qué hayan decidido los demás participantes del mercado [44]. En la versión original de este juego, cada participante debe decidir entre dos opciones, digamos comprar o vender un bien en el mercado. La particularidad del juego consiste en que la decisión redituable es aquélla que coincide con la de la minoría de los participantes. La justificación de esta regla es que, si la mayoría de los participantes decide vender, por ejemplo, entonces los compradores, que son menos, pueden adquirir el bien a un precio bajo. Si, en cambio, la mayoría de los participantes decide comprar, entonces aquéllos que decidieron vender podrán hacerlo a precios altos. Sin embargo, por definición, dado que es la minoría de los participantes los que pueden ganar el juego, es más probable perder que ganar. Si este juego se repite en múltiples ocasiones, entonces los participantes pueden tratar de formular estrategias que les reditúen máxima ganancia, o, si no, mínimo riesgo, o ambos. En general, estas estrategias que se basan en la historia de los resultados previos, son un elemento inherente de heterogeneidad. Dependiendo entonces de la naturaleza de las estrategias de los participantes, así como del número de participantes en el juego, este modelo de decisión puede dar lugar a comportamientos colectivos inesperados [45].

Distribución espacial de tiendas

Otra área de aplicación de la teoría de juegos en la descripción de los procesos de toma de decisiones, concierne al problema de distribución espacial de tiendas y otros tipos de diferenciación entre negocios [46]. Es un lugar común decir que la ubicación de un negocio es un factor fundamental para que éste prospere. De hecho, hay compañías a las que puedes contratar para llevar a cabo la selección de ubicaciones óptimas para un negocio. Sin embargo, es notable que frecuentemente uno halle varias joyerías juntas, en una o dos cuadras de una ciudad y que éstas prosperen como negocios. En cambio, es muy raro encontrarse con un agregado similar de farmacias. Más bien, para prosperar, las farmacias parecen requerir ubicarse lejos unas de otras. Este fenómeno está ilustrado en la figura 6, que muestra la ubicación de farmacias y joyerías cerca del centro de la ciudad de México. Bajo la suposición de que los dueños de los negocios, tanto de joyerías como de farmacias llevan a cabo la estrategia que maximiza sus ganancias, es decir, haciendo la hipótesis de que los dueños son agentes racionales, resulta interesante que dependiendo del giro, las estrategias sean tan diferentes. De igual manera, las galerías de arte tienden a agregarse, así como las tiendas de vestidos de novia y las tiendas de libros usados; mientras que las panaderías, al igual que las farmacias, tienden a separarse. Este comportamiento, que recuerda a las transición de fase, surge de la competencia entre las tiendas por atraer al mayor número de clientes, al mismo tiempo que busca cobrarles lo más posible por su producto. Estas estrategias dependerán del comportamiento de los clientes, y dan lugar a interacciones efectivas de repulsión o atracción entre las distintas tiendas de cada giro.

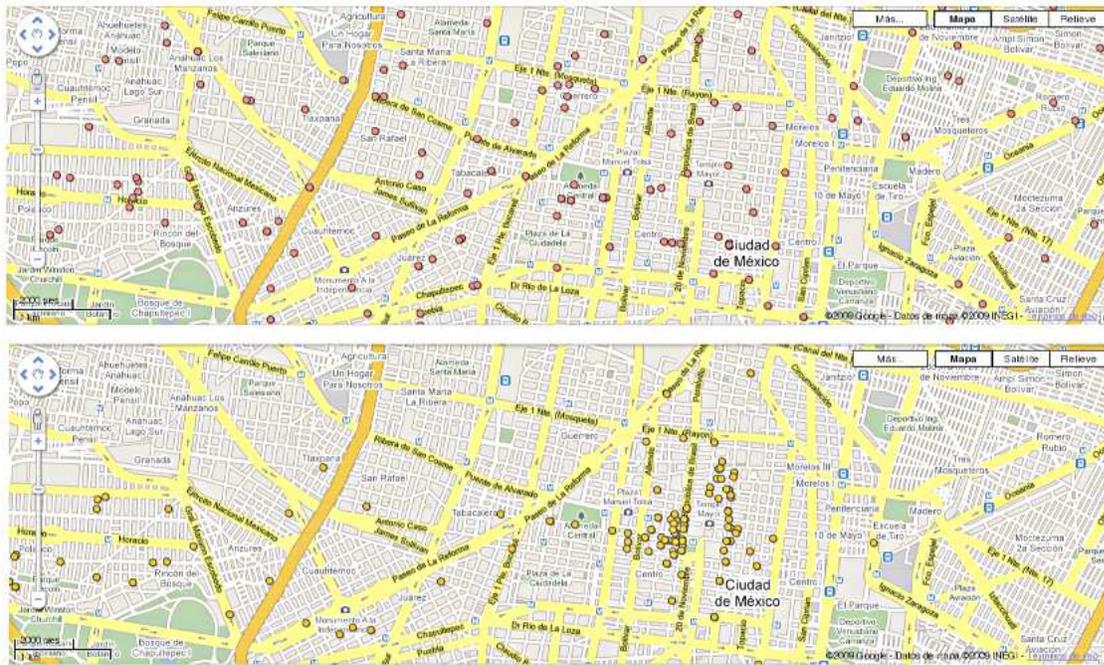


Figura 6: Distribución de ubicaciones de farmacias y joyerías cerca del centro de la Ciudad de México. Arriba se muestran las farmacias, que no se agregan entre sí; abajo las joyerías, que se ubican muy cerca unas de otras. Imagen cortesía de Google Maps©.

¡Y mucho más!

Necesitaríamos todo un libro para agotar los temas en los que la física ha intentado contribuir en economía, y otro tanto para cubrir los temas en los que pueda influir en el futuro. Por ejemplo, está el problema de tratar de entender los factores detrás de la distribución de riquezas. A principios del siglo pasado, el italiano Vilfredo Pareto observó que la distribución de riquezas en distintos países y en distintas épocas estaba bien descrita por una ley de potencia. Evidentemente, este tipo de resultados de carácter “universal” son muy atractivos para los físicos. En particular porque las leyes de potencia de tipo universal aparecen de manera natural en los estados críticos de sistemas de partículas interactuantes en mecánica estadística, y trae consigo otros fenómenos característicos, como correlaciones de largo alcance, etcétera. De hecho, esta similitud probablemente haya motivado varios modelos sencillos de intercambio entre agentes, sin producción de riquezas, que no han sido muy del agrado de los economistas [47].

Otro tema que se vislumbra como un buen candidato para una colaboración fructífera

entre la física y la economía es el de redes complejas². El fenómeno económico que se necesita entender es el hecho de que las crisis económicas se contagian de una región a otra, y en ocasiones, al mundo entero. Una posible explicación de este fenómeno es que los bancos e instituciones financieras de distintas regiones están relacionados: son filiales unos de otros, o tiene vínculos de otra índole, de manera que están “conectados” entre sí, como se muestra en la figura 7. Entonces, cuando una crisis regional impide a un banco cubrir sus deudas, los bancos acreedores también pueden enfrentarse a problemas de falta de liquidez, suspender el otorgamiento de créditos, abriendo las puertas a una crisis en su propio país. Así, cada banco puede propagar el problema a sus filiales y socios como una epidemia propagándose en una red compleja, un problema que ha sido ampliamente estudiado desde la perspectiva de la física [48].

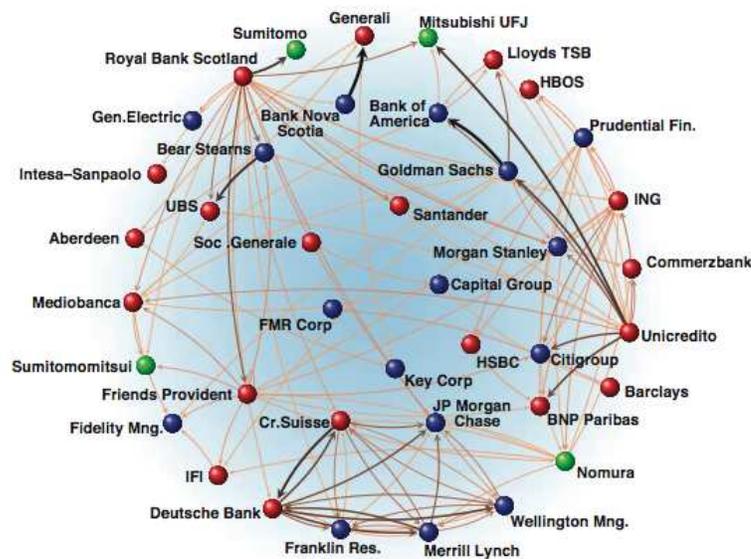


Figura 7: Redes económicas, que muestran las relaciones entre instituciones financieras, que se forman a través de propiedades, deudas o préstamos y otros tipos de intercambios. En esta figura, los nodos de la red son las firmas de diferentes tamaños y capital. Fuente: [49].)

Hasta la fecha, los economistas no están muy impresionados con el trabajo de los físicos en la economía [50], con la posible excepción de las finanzas cuantitativas, que es un área más abierta, cuyos practicantes gustan de modelos de fluctuaciones comunes a los que se usan en física. De hecho, la aceptación del enfoque de la física en finanzas posiblemente ha funcionado porque es un área que funciona un poco como la física: con grandes cantidades de datos que pueden ser analizados, y que sirven como la contraparte empírica a la teoría. Sin embargo, en general, los economistas se han visto renuentes a aceptar

² Véase, de Lucas Lacasa, el capítulo “Redes, Interacciones, Emergencia” en este volumen.

los nuevos enfoques que propone los físicos, pero estamos seguros de que conforme se logren más avances, y conforme los físicos aprendan más economía, el vínculo entre ambas disciplinas se volverá más estrecho y se logrará resolver problemas que, por lo pronto, ni una de las dos disciplinas puede resolver por sí sola.

4. Referencias

- [1] S. Landsburg, *The Armchair Economist*. The free press, 1993.
- [2] —, *Price theory and applications*, 2nd ed. Dryden Press, 1992.
- [3] I. Steward, “The mathematical equation that caused the banks to crash,” *The Guardian* (online), UK, feb 2012.
- [4] J. Hull, *Options, Futures and Other Derivatives*. Prentice Hall, 2008.
- [5] F. Black and M. Scholes, “The Pricing of Options and Corporate Liabilities,” *Journal of Political Economy*, vol. 81, no. 3, 1973.
- [6] P. Wilmott, *Paul Wilmott on Quantitative Finance*. Wiley, 2006.
- [7] B. Sharma, S. Agrawal, M. Sharma, D. Bisen, and R. Sharma, “Econophysics: A brief review of historical development, present status and future trends,” arXiv:0810.5306, 2011.
- [8] P. Krugman, “How did economists get it so wrong?” *The New York Times* (online), sept 2009.
- [9] E. Zurich, “Predicting economic crises with “econophysics”,” *Sciencedaily.com*, may 2010.
- [10] R. Cont and J.-P. Bouchaud, “Herd behavior and aggregate fluctuations in financial markets,” *Macroeconomic Dynamics*, vol. 4, pp. 170–196, 2000.
- [11] F. Lillo, E. Moro, G. Vaglica, and R. Mantegna, “Specialization of strategies and herding behavior of trading firms in a financial market,” *New J. Phys.*, vol. 10, p. 043019, 2008.
- [12] J.-P. Bouchaud, “Crises and collective socio-economic phenomena: cartoon models and challenges,” arXiv:1209.0453v1, 2012.
- [13] E. Fama, “The behavior of stock market prices,” *Journal of Business*, vol. 38, pp. 34–105, 1965.

- [14] R. Mantegna and H. Stanley, *An Introduction to Econophysics*. Cambridge University Press, 2000.
- [15] L. Bachelier, *Theory of Speculation, translation in: P.H. Cootner (Ed.), The Random Character of Stock Market Prices*. MIT Press, 1964.
- [16] H. Saleur, C. Sammis, and D. Sornette, "Discrete scale invariance, complex fractal dimensions, and log-periodic fluctuations in seismicity," *Journal of Geophysical research*, vol. 101, no. B9, pp. 17–661, 1996.
- [17] D. Sornette, "Predictability of catastrophic events: material rupture, earthquakes, turbulence, financial crashes and human birth," *Proc. Nat. Acad. Sci.*, vol. 99, no. 1, pp. 2522–2529, 2002.
- [18] A. Chakraborti, I. Toke, M. Patriarca, and F. Abergel, "Econophysics review: I. empirical facts," *Quantitative Finance*, vol. 11, no. 7, pp. 991–1012, 2011.
- [19] B. Mandelbrot, "The variation of certain speculative prices," *Journal of Business*, vol. 26, pp. 394–419, 1963.
- [20] R. Cont, "Empirical properties of assets returns: stylized facts and statistical issues," *Quantitative Finance*, vol. 1, pp. 223–236, 2001.
- [21] R. Mantegna and H. Stanley, "Stochastic Process with Ultra-Slow Convergence to a Gaussian: The Truncated Levy Flight," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 73, pp. 2946–2949, 1994.
- [22] T. Lux, "Applications of Statistical Physics in Finance and Economics," *Kiel Working Paper*, no. 1425, 2008.
- [23] J.-P. Bouchaud and M. Potters, *Theory of Financial Risks: From Statistical Physics to Risk Management*. Cambridge University Press, 2000.
- [24] R. Mantegna and H. Stanley, "Scaling behavior in the dynamics of an economic index," *Nature*, vol. 376, pp. 46–49, 1995.
- [25] D. Sornette, A. Johansen, and J.-P. Bouchaud, "Stock market crashes, precursors and replicas," *Journal of Physique I*, vol. 6, no. 1, pp. 167–175, 1996.
- [26] A. Johansen and D. Sornette, "Stock market crashes are outliers," *European Physical Journal B*, vol. 1, pp. 141–143, 1998.
- [27] Z. Eisler, J. Kertész, and F. Lillo, "The time order book on different time scales," arXiv:0705.4023, 2007.
- [28] J.-P. Bouchaud, M. Mézard, and M. Potters, "Statistical properties of stock order books: empirical results and models," *Quantitative Finance*, vol. 2, pp. 251–256, 2002.

- [29] S. Maslov and M. Mills, "Price fluctuations from the order book perspective: Empirical facts and a simple model," *Physica A*, vol. 299, pp. 234–246, 2001.
- [30] P. Bak, M. Paczuski, and M. Shubik, "Price variations in a stock market with many agents," *Physica A*, vol. 246, pp. 430–453, 1997.
- [31] G. Stigler, "Public regulations of the securities markets," *The Journal of Business*, vol. 37, p. 117, 1964.
- [32] S. Maslov, "Simple model of a limit order-driven market," *Physica A*, vol. 278, p. 571, 2000.
- [33] D. Challet and R. Stinchcombe, "Non-constant rates and over-diffusive prices in a simple model of limit order markets," *Quantitative Finance*, vol. 3, pp. 155–162, 2003.
- [34] A. Chakraborti, I. Toke, M. Patriarca, and F. Abergel, "Econophysics review: Ii. agent-based models," *Quantitative Finance*, vol. 11, no. 7, pp. 1013–1041, 2011.
- [35] R. Cont and A. De Larrard, "Price dynamics in a markovian limit order market," arXiv:1104.4596, 2011.
- [36] —, "Order book dynamics in liquid markets: limit theorems and diffusion approximations," arXiv:1202.6412, 2012.
- [37] A. Langnau and Y. Punchev, "Stochastic price dynamics implied by the limit order book," arXiv:1105.4789, 2011.
- [38] Yudovina, "A simple model of a limit order book," arXiv:1205.7017, 2012.
- [39] K. Vaninsky, S. Myzuchka, and A. Lukov, "A multi-agent nonlinear markov model of the order book," arXiv:1208.3083, 2012.
- [40] T. Schmitt, R. Schäfer, and T. Münnix, M. and Guhr, "Microscopic understanding of heavy-tailed return distributions in an agent-based model," arXiv:1207.2946, 2012.
- [41] F. Abergel, B. Chakraborti, A. Chakraborti, and M. Mitra, Eds., *Econophysics of Order-driven Markets*. Springer, 2011.
- [42] V. Plerou, P. Gopikrishnan, B. Rosenow, L. Amaral, T. Guhr, and H. Stanley, "Random matrix approach to cross correlations in financial data," *Physical Review E*, vol. 65, p. 066126, 2002.
- [43] O. M. John Von Neumann, *Theory of games and economic behavior*. Princeton University Press, 1944.
- [44] D. Challet and Y. Zhang, "On the minority game: Analytical and numerical studies," *Physica A*, vol. 256, p. 514, 1998.

- [45] D. Challet, M. Marsili, and Y. Zhang, "Stylized facts of financial markets and market crashes in minority games," *Physica A*, vol. 294, pp. 514–524, 2001.
- [46] H. Hotelling, "Stability in competition," *Economic Journal*, vol. 39, no. 153, pp. 41–57, 1929.
- [47] M. Gallegati, S. Keen, T. Lux, and P. Ormerod, "Worrying trends in econophysics," *Physica A*, vol. 370, pp. 1–6, 2006.
- [48] A.-L. Barabasi, *Linked: How Everything Is Connected to Everything Else and What It Means*. Plume, 2002.
- [49] F. Schweitzer, G. Fagiolo, D. Sornette, F. Vega-Redondo, A. Vespignani, and D. White, "Economic networks: The new challenges," *Science*, vol. 325, no. 422, 2009.
- [50] P. Ormerod, "Econophysics and The Social Sciences: Challenges and Opportunities," *Journal of Natural and cultural sciences*, vol. 76, pp. 345–351, 2010.