

# **PARTE I**

## **Ingeniería y catástrofe**



## CAPITULO 1

# El análisis económico de las finanzas

## Equilibrio, información y azar

*Antes de ponernos a hacer ingeniería financiera, con sus 'productos derivados', debemos en primer lugar "asegurarnos bien del hecho"... No podemos darle al ingeniero el placer de hacer suyos los arrepentimientos del sabio. (Mandelbrot, 1997c: 9)*

### Introducción

El programa de investigación académica emprendido a partir del primer cuarto de este siglo sobre la posibilidad de aplicar determinadas herramientas de modelización matemática y estadística, como el cálculo diferencial estocástico o la optimización dinámica, para comprender fenómenos tan endemoniadamente históricos como la racionalidad especulativa y el riesgo financiero, sólo puede entenderse como parte integrante del proceso evolutivo general de las formas culturales de conocimiento y organización económica que predominan en las sociedades industriales avanzadas (Bell, 1976). Sólo desde este punto de vista es posible entender también que dicho programa de investigaciones haya acabado estrechamente asociado, en su contenido cultural tanto como en su destino histórico, con el naciente imperio de la gestión macrofinanciera a escala internacional del riesgo económico. Un destino común cuya encarnación suprema es esa avalancha cotidiana de símbolos alfanuméricos en las pantallas de las terminales informáticas que prestan cuerpo a los mercados internacionales de productos financieros derivados.

### Breve historia de los mercados de derivados financieros

Los contratos financieros dichos 'derivados', que permiten asegurar el precio de compraventa futura de diferentes productos de inversión, sean estos mercaderías agrícolas, materias primas, metales preciosos, títulos de crédito o participaciones de capital empresarial,

han existido en los mercados de valores desde hace varios siglos. Pero su comercio ha sido tradicionalmente restringido e idiosincrásico, con términos contractuales establecidos *ad hoc* y conocidos sólo por las partes implicadas -esta modalidad de negociación suele conocerse en los mercados actuales como mercado OTC (*over-the-counter*) o mercado extrabursátil. Las normas de derecho mercantil por las que se rige la escritura de nuestros actuales contratos de compraventa a plazo, compraventa futura y compraventa opcional de valores de inversión (Madrid Parra, 1994), fueron conformándose lentamente a lo largo de la primera mitad del siglo XX, a partir de su empleo inicial en el comercio de mercaderías agrícolas y materias primas, dos de los sectores productivos más proclives a sufrir fluctuaciones aleatorias en su ciclo productivo por causa de perturbaciones climáticas y geofísicas.

El establecimiento de mercados de futuros sobre mercaderías agrícolas y materias primas (*commodities*) ha marcado la pauta para la posterior proliferación de los mercados de futuros sobre instrumentos financieros y de toda la posterior parafernalia de la ingeniería de derivados financieros. Así, los primeros mercados organizados de contratos de compraventa futura se establecieron en Estados Unidos en la década de 1930, durante la Gran Depresión, para cubrir los riesgos económicos, tanto climáticos como inflacionarios, de la producción triguera. Por su parte, los orígenes histórico-mercantiles de las opciones financieras pueden rastrearse varios siglos atrás en la historia del cálculo y las instituciones económicas. Notablemente, en la llamada “fiebre de los tulipanes holandeses”, una burbuja especulativa que se desarrolló durante el segundo cuarto del XVII y que explotó en el año 1736. Tras la prohibición legislativa de este tipo de acuerdos en diversos países, a mediados del siglo XVIII las dos plazas hegemónicas de las finanzas internacionales, las bolsas de Londres y Amsterdam, volvieron a registrar con cierta regularidad acuerdos y cotizaciones de opciones de compraventa sobre diversos tipos de materias primas y valores (Neal, 1990: 152-153). Asimismo, el tradicional mercado de seguros Lloyd’s de Londres, donde se concentra en la actualidad gran parte del negocio internacional de los reaseguros y cuyas actividades se remontan también a fines del siglo XVII, puede ser considerado asimismo otro precursor de las modernas tecnologías de ingeniería financiera. El peculiar estilo de organización descentralizada imperante en este mercado de seguros desde su creación –el sistema de ‘sindicatos’ de inversores particulares (‘nombres’) y su norma de responsabilidad ilimitada– es uno de los ejemplos más tempranos de sistema de desintermediación y comercio minorista

o ‘titulización’ (*securitization*) de riesgos financieros.<sup>1</sup>

La comercialización organizada de futuros y opciones tal como la conocemos en la actualidad, en la forma de contratos estandarizados, sistemas de cotización pública y cámaras de compensación independientes, no se inició realmente hasta principios de los años 70 del siglo XX, siendo pioneros los intermediarios financieros estadounidenses, en particular, los departamentos de análisis y arbitraje de los grandes bancos de negocios e inversiones de Wall Street, como First Boston, J.P Morgan, Morgan Stanley, Merrill Lynch, Bankers Trust, Goldman Sachs, Salomon Brothers y otros.

### Los derivados financieros: de América para el mundo

El primer mercado organizado de futuros financieros de la era moderna se puso en marcha en 1972 en una de las dos bolsas de la ciudad de Chicago, el Chicago Mercantil Exchange (CME), con el lanzamiento de un contrato estandarizado de futuros sobre divisas. Un año después, en abril de 1973 (justamente un mes antes de la publicación en el *Journal of Political Economy* del artículo fundacional de Black y Scholes sobre la teoría matemática de la valoración de opciones) comienza a funcionar también en Chicago pero esta vez en el otro mercado de valores de la ciudad, el Chicago Board of Trade (CBOT), el primer mercado mundial de opciones sobre instrumentos financieros: el Chicago Board of Options Exchange (CBOE).

En 1981 y nuevamente en el CME de Chicago, comienza sus operaciones el primer mercado de liquidación en efectivo (*cash-settle*) de contratos de futuros sobre instrumentos financieros subyacentes. Este tipo de contratos se finiquitan únicamente en términos de diferenciales nominales, sin ningún intercambio de mercancías tangibles de por medio. Los contratos de futuros *cash-settle*, una de las más poderosas herramientas que han contribuido

---

<sup>1</sup> La quiebra técnica del mercado Lloyd’s a principios de los 90, detonada por una oleada de sentencias dictadas por tribunales de EE.UU. durante la década de los 80 que obligaron a un buen número de empresas de seguros reaseguradas por los sindicatos de Lloyd’s a pagar indemnizaciones astronómicas por “daños punitivos” a grupos de demandantes expuestos a diversos productos tóxicos de origen industrial (pesticidas químicos, asbestos) causantes de riesgos cancerígenos, ha sido justamente considerada como una de las mayores catástrofes financieras de nuestra era (Raphael, 1995). Por otro lado, desde el punto de vista del análisis microeconómico de los incentivos eficientes en ambientes de información asimétrica, la quiebra y posterior reorganización del Lloyd’s de Londres ha sido considerada la ilustración más dramática de los problemas de agencia, selección adversa y azar moral que la nueva economía de la información había venido identificando desde principios de los años 70 como los principales “cánceres organizativos” de los sistemas descentralizados

al crecimiento exponencial de la liquidez y velocidad transaccional del capital financiero, se negociaron inicialmente sobre el valor subyacente de la cotización de los Eurodólares. Posteriormente, en 1982, fue lanzado por primera vez al mercado uno de los productos estrella de la ingeniería financiera actual: los contratos de futuros *cash-settle* sobre el valor nominal de un índice bursátil (Miller, 1994b). Un ejemplo de mercado de derivados *cash-settle* es el mercado de futuros y opciones sobre el valor nominal del índice bursátil Ibex 35 que agrupa a las empresas de mayor capital que cotizan en el mercado continuo del sistema de bolsas españolas. En Europa los mercados organizados de derivados financieros, futuros y opciones principalmente, comienzan a proliferar durante la segunda mitad de la década de los 80 al abrigo de las bolsas nacionales más importantes.<sup>2</sup> Nacen así los mercados LIFFE (London International Financial Futures Exchange) y LTOM (London Traded Options Market) en la bolsa de Londres; el MATIF (Marché à Terme International de France) y el MONEP (Marché des Options Negociables de París) en la de París; el DTB (Deutsche Terminbörse) en Frankfurt; el EOE (European Options Exchange) en Amsterdam o el OM (Options Market) y el SOFE (Sweden Options and Futures Exchange) en Estocolmo.<sup>3</sup>

La organización que defiende los intereses de la industria internacional de derivados financieros en los foros de discusión internacional y ante las autoridades reguladoras de carácter nacional y transnacional (principalmente el Banco de Pagos Internacionales de Basilea) es la International Swaps and Derivatives Association (ISDA). El principal vehículo de información profesional y divulgación periodística que publicita las excelencias de este nuevo tipo de tecnologías aseguradoras, es la revista *Risk*, el portavoz editorial de los

---

de asignación económica.

<sup>2</sup> En 1986 las bolsas de derivados estadounidenses acaparaban todavía el 90% del comercio organizado de productos financieros derivados. Pero ya en 1990 el 60% del comercio mundial de derivados tenía lugar fuera de Estados Unidos (Steinherr, 1998: 170-173).

<sup>3</sup> Muchas de las anteriores denominaciones han cambiado a lo largo de los últimos cinco años a causa de la fiebre de fusiones y adquisiciones que barre el mercado internacional de sistemas propietarios de bolsas de derivados (prácticamente cada semana se produce un anuncio de “alianza internacional” entre sociedades gestoras de bolsas nacionales). Ejemplos notables en este sentido han sido la alianza del DTB de Frankfurt y el Swiss Option & Financial Futures Exchange (SOFFEX) de Zurich, que se fusionaron bajo el nombre de EUREX; y la fallida aventura de GLOBEX, una bolsa electrónica internacional de futuros y opciones entre cuyos principales promotores se encontraban los consorcios rectores de las bolsas de Chicago y París. Uno de los motores de esta dinámica inacabable de reorganización industrial de las bolsas internacionales de derivados es sin duda la continua innovación tecnológica y la competencia exacerbada en el mercado de sistemas informáticos de negociación bursátil automatizada (Domowitz, 1995; Godechot, Hassoun y Muniesa, 2000). Sobre el vínculo entre investigación académica e innovación tecnológica en la industria de sistemas electrónicos de negociación bursátil véanse Muniesa (2000a y 2000b) y Mirowski (2000). El reciente estudio de Knorr-Cetina y Brueger (2002) ofrece un fino análisis fenomenológico de algunos de los detalles específicos (así, la abrumadora presencia de vocablos taquigráfico de tipo alfanumérico) de las estructuras de interacción social (conversacional) que dinamizan los automatismos informáticos de los modernos mercados interbancarios de

consorcios financieros globales para quienes trabaja el grueso de la comunidad profesional internacional de ingenieros de derivados financieros. Lanzada inicialmente en 1987 por un grupo editorial londinense, esta publicación mensual informa sobre los eventos más recientes acaecidos en la industria internacional de derivados financieros (regulación, fusiones, apertura de nuevos mercados y productos, etc.) y las últimas tendencias tecnológicas y empresariales en materia de gestión de riesgos financieros.<sup>4</sup>

Los contratos de opción propiamente dichos abarcan hoy en día toda la gama disponible de instrumentos financieros: existen opciones sobre acciones e índices bursátiles, opciones sobre bonos de deuda y tipos de interés, opciones sobre divisas y tipos de cambio, opciones sobre futuros sobre índices, opciones sobre opciones, etc. Según cifras del FMI este tipo de contratos ha crecido a una media anual del 32% a lo largo de los últimos 10 años, hasta alcanzar en 1996 una cifra aproximada de 1000 millones de contratos en todo el mundo, por un valor aproximado de 9,9 billones de dólares (1.435 billones de pesetas). Las estadísticas internacionales más recientes disponibles sobre el negocio económico de la ingeniería financiera de valores sintéticos son los datos de un exhaustivo estudio sobre el tamaño y la estructura de los mercados de derivados financieros en el mundo incluido en el último informe trianual (1992-1995) del Banco de Pagos Internacionales de Basilea.<sup>5</sup> Según este estudio realizado de manera coordinada por 26 bancos centrales y que estima cubrir las cifras de negocio del 90% de los intermediarios financieros activos en dichos mercados, el tamaño económico global de los mercados de derivados mundiales a fecha de 31 de marzo de 1995 era de 57 billones de dólares, medidos en términos del valor nominal de los contratos vivos en tal fecha. De los cuales, 16,6 billones corresponden a contratos negociados en mercados organizados y

---

divisas.

<sup>4</sup> Desde el año 1990 el nuevo editor de la revista es la compañía Financial Engineering Associates Ltd., un *consulting* financiero de California pionero en el desarrollo de *software* para la industria de derivados financieros. Financial Engineering Associates fue fundada y está presidida por el profesor de finanzas de la Universidad de Berkeley Mark Garman, una autoridad científica internacional en la teoría de la “microestructura” de los mercados bursátiles y los modelos de valoración de opciones financieras “exóticas”. *Risk* es asimismo el órgano editorial de la recién fundada Asociación Internacional de Ingenieros Financieros (IAFE), con sede en Londres. En colaboración con la IAFE, *Risk* organiza periódicamente conferencias, talleres y congresos profesionales para debatir sobre los últimos desarrollos tecnológicos, empresariales y legislativos en el área de la gestión del riesgo financiero mediante instrumentos derivados. Finalmente, *Risk* se ha convertido en un importante foro público de debate donde los hombres de negocios y los reguladores públicos intercambian ideas y críticas. Otras publicaciones especializadas en el tratamiento de los mercados internacionales de derivados desde una óptica más o menos periodística o divulgativa son la publicación inglesa *Financial Derivatives & Risk Management* y las americanas *Futures and Options World*, *Derivatives Quarterly* y *The Journal of Derivatives* (estas dos últimas de carácter más técnico).

<sup>5</sup> Daniel Manzano y Enrique Sánchez del Villar, “Los instrumentos derivados en el mundo”, diario EL PAIS (suplemento NEGOCIOS), domingo 7/1/1996, 14.

40,7 billones se mueven en mercados privados paralelos o mercados OTC (*over the counter*). El mismo estudio destaca los contratos de futuro y los contratos *swap* (permuta de flujos financieros) sobre tipos de interés, los *swaps* de divisas y las opciones sobre futuros en tipos de cambio y tipos de interés como los segmentos de productos más importantes según su participación relativa en el volumen de negocio global de estos mercados. Más recientemente, en junio de 1997 se estimaba que el valor nominal del total de contratos “vivos” de derivados financieros OTC ascendía a 29 trillones de dólares.<sup>6</sup> Durante los primeros seis meses del año el valor acumulado de las transacciones en productos derivados de todo tipo llevadas a cabo a lo largo y ancho del globo se estimaba en la friolera de 356.8 trillones de dólares.

### Derivados en España

Al contrario de lo que había sucedido con otras innovaciones financieras, como la gestión de carteras diversificadas y las sociedades de inversión colectiva, cuya importación fue bastante tardía, en España los mercados de futuros y opciones financieras comenzaron a implantarse -con notable éxito- a finales de los 80 y principios de la década de los 90, prácticamente al mismo tiempo que en el resto de sus vecinos europeos.

El proceso histórico de implantación de los mercados de derivados financieros en España ha pasado por varias etapas (Madrid Parra, 1994: 36-39). Ya desde 1978 la legislación española permitía a los inversionistas residentes con negocios en el extranjero el uso de los futuros y las opciones financieras que se comercializaban en los mercados internacionales para la cobertura de sus inversiones en el exterior. En 1988, una circular del Banco de España estableció las bases para la creación de un primer mercado interbancario de opciones sobre divisas. En 1989 comenzó a funcionar el primer mercado organizado de opciones en España, el OMib, de la mano de la sociedad de valores OM Ibérica con sede en Madrid (empresa filial de la multinacional sueca OM que gestiona entre otros el mercado de opciones de Estocolmo). En febrero de 1991 el mercado OMib pasa a denominarse Mofex (Mercado Español de Opciones Financieras), y a finales del mismo año Mofex se fusiona con Meffsa (Mercado Español de Futuros Financieros), otra sociedad creada en Barcelona en 1990 especializada en el negocio de futuros financieros sobre divisas y tipos de interés. La fusión de Mofex y Meffsa en diciembre de 1991 da origen al actual *holding* MEFF SA, Sociedad

---

<sup>6</sup> Simon Davies, “Turbulence threatens flourishing markets”, *Financial Times -Derivatives Survey*, julio 17, 1.



Rectora de Productos Financieros Derivados.

El negocio de MEFF se subdivide desde entonces basándose en el criterio del activo subyacente del derivado (renta fija/renta variable) y no, como en la situación anterior, según el tipo de producto derivado (futuros/opciones). Se establecerá así un mercado de derivados sobre valores de renta fija (bonos de deuda) en Barcelona (MEFF Renta Fija/RF) y otro sobre valores de renta variable (acciones e índices bursátiles) en Madrid (MEFF Renta Variable/RV), integrando cada uno de ellos la negociación de los dos tipos de productos derivados, futuros y opciones, comercializados anteriormente por Meffsa y Mofex (Oller, 1994). En MEFF RF se negocian desde 1991 futuros y opciones en tipos de interés (sobre bonos de deuda pública a 3 y 10 años, sobre el tipo de interés interbancario MIBOR a 90 y 360 días y más recientemente, desde 1996 (aunque con poco éxito a causa de la convergencia de tipos asociada a la por entonces inminente integración monetaria) sobre el diferencial de rentabilidad entre los bonos españoles y los bonos alemanes (*Bunds*), con los contratos DIFF (Ontiveros y Valero, 1997: 221). MEFF RV comenzó en 1992 la comercialización de futuros y opciones sobre el índice bursátil IBEX 35. Posteriormente, en el periodo 1994-1995, lanzó contratos de opción sobre acciones de empresas individuales (Telefónica, Repsol, Endesa, BBV, Iberdrola, Banco de Santander, Eléctrica Sevillana, Acesa, Argentaria y Fecsa) (Oliver, 1996: 193).

Dos años después de su puesta en funcionamiento, en el ejercicio bursátil de 1993, el volumen total de contratación en pesetas en los mercados de derivados españoles era ya del orden de 2 veces el volumen de capital movido por los mercados de contado subyacentes. En el ejercicio bursátil de 1994 el volumen de contratos negociados por Meffsa se incrementó en un 143% respecto al ejercicio de 1993, hasta un total de 55,1 millones (19,7 millones de contratos en renta fija y 35,4 millones en renta variable). Los 55 millones de contratos de derivados negociados por Meffsa en 1994 se tradujeron en un movimiento nominal total de 202 billones de pesetas. Estos volúmenes de negociación situaban aquel año al mercado español de derivados financieros en el cuarto lugar del *ranking* europeo (entre un total de 23 mercados) y en el noveno lugar del *ranking* mundial, que agrupa a un total de 70 mercados organizados de derivados. En el ejercicio bursátil de 1995, el mercado MEFF se mantuvo en sus cifras de 1994: MEFF RF tuvo un volumen de contratación ligeramente inferior al año anterior (19 millones de contratos) y MEFF RV aumentó sus operaciones hasta un total de 37,1 millones de contratos. Las cifras para 1996 y 1997, que siguen mostrando crecimiento aunque de manera menos abrupta -crecimiento que afecta sobre todo a los dos productos

estrella, las opciones sobre el bono a diez años de MEFF RF y los futuros sobre el Ibex de MEFF RV- muestran la madurez de los mercados de derivados españoles (Ontiveros y Valero, 1997: 216-223).

## **Un funcionalismo en funcionamiento: introducción a la historia del análisis económico de las finanzas**

El saber convencional del análisis económico de las finanzas se sustancia en una pequeña colección básica de modelos (matemáticos) funcionalistas: los modelos neoclásicos de eficiencia informacional en los mercados de capital, formación de carteras óptimas, valoración de activos mediante arbitraje y estructuras consistentes de financiación empresarial. En estos modelos, la eficiencia asignativa relativa de las diferentes formas empíricas de organización financiera se determina en relación con el grado de cumplimiento de una serie exhaustiva de funciones económicas “naturales”, por tanto universales e intemporales: realización de pagos, agregación y transferencia de recursos, diversificación de riesgos, comunicación de información y provisión de incentivos (Crane y otros, 1995).

A lo largo de los poco más de 60 años que abarca la historia de la moderna teoría matemática de las finanzas, pueden distinguirse, *grosso modo*, tres áreas analíticas elementales. La primera de ellas se ocupa de los rasgos probabilísticos que permiten identificar a nivel fenomenológico las condiciones subyacentes de la eficiencia informacional del mercado (hipótesis del paseo aleatorio) (Malkiel, 1992). La segunda gira en torno a la modelización econométrica de las condiciones microeconómicas del proceso de valoración eficiente de activos (formalización del principio riesgo-rentabilidad) (Brennan, 1991). La tercera, erigida sobre la centralidad teórica concedida a la condición de ‘imposibilidad de arbitraje’ como fundamento último del equilibrio eficiente (Ross, 1978), abarca las investigaciones sobre aplicación de métodos de programación dinámica y control estocástico en la modelización de los procesos de valoración intertemporal. Es dentro de este tercer programa de investigación donde se incluye, junto con los modelos de intermediación financiera en condiciones de información asimétrica (Diamond y Dybvig, 1983), la teoría matemática valoración y ‘síntesis’ de derivados financieros (Rubinstein, 1987).

La maniobra de aproximación que hizo posible capturar originalmente el fenómeno financiero contemporáneo dentro de la red de simetrías lógico-matemáticas del marginalismo económico,

fue emprendida a lo largo de la década de 1950 y los primeros años 60 por una serie de investigadores en los campos de la estadística matemática (Kendall, Mandelbrot), la investigación de operaciones (Roberts, Osborne) y la economía matemática (Working, Samuelson, Fama) y recogidos en un volumen colectivo publicado en 1964 bajo el título *The Random Character of Stock Market Prices (El carácter aleatorio de los precios bursátiles)* (Cootner, 1964). Estas investigaciones pioneras sobre modelización econométrica y formalización matemática de la estructura probabilística de variación temporal de los precios en las bolsas de valores, culminaron en la mitad de los años 60 con la formulación del principio analítico sobre el que habrá de sustentarse todo el edificio teórico de la economía financiera neoclásica posterior: la hipótesis del “paseo aleatorio” de los precios en los mercados eficientes de capital.

#### La teoría estadística de la eficiencia bursátil: de Bachelier a Samuelson

La línea académica de teorización e investigación sobre la estructura estadística de los cambios en las cotizaciones bursátiles se pone en marcha con la publicación, en 1934, de un artículo en el *Journal of the American Statistical Association* titulado “El uso de series de diferencias aleatorias en el análisis de series temporales”, del estadístico y economista agrícola del Stanford Food Research Institute, Holbrook Working. En este artículo se presenta por primera vez a la comunidad académica de estadísticos y economistas norteamericanos un particular modelo matemático probabilista que da cuenta de las fluctuaciones de precios empíricos en los mercados especulativos en la forma de un viaje o paseo aleatorio. Pero, según mantiene el historiador oficial de la teoría financiera moderna (Bernstein, 1992), el primer modelo econométrico de las variaciones bursátiles habría sido desarrollado -en una forma matemática bastante más elaborada- treinta años atrás, en 1900, por un desconocido matemático francés, Louis Bachelier, en una extraña (para su momento y lugar) tesis doctoral en economía financiera matemática titulada *Théorie de la spéculation*.<sup>7</sup> El modelo del comportamiento de los

---

<sup>7</sup> Desde una perspectiva más amplia de historia de la ciencia, lo interesante del “caso Bachelier” (Mandelbrot, 1987: 181-83) no es sólo que precediese a Working en la formulación de un modelo matemático de las fluctuaciones financieras. Los hallazgos de Bachelier sobre la simetría probabilística de los cambios de precios en la Bolsa de París se adelantaron en cinco años a la publicación por Einstein (1905) de un famoso modelo matemático del movimiento browniano, considerado por los historiadores de la ciencia como la primera piedra del nuevo enfoque indeterminista que habría de imponerse posteriormente a lo largo de todo el siglo XX como paradigma teórico dominante en la física subatómica (Brush, 1977).

precios especulativos ideado por Bachelier, denominado movimiento browniano absoluto o aritmético, consistía en una sucesión temporal continua de niveles de precios sucesivos no correlacionados entre sí. Esta serie continua de movimientos de fluctuación completamente independientes al nivel de las relaciones estadísticas, poseía la interesante particularidad de que la tasa de crecimiento de fluctuación o desviación media de los precios agregados a lo largo de un intervalo temporal determinado estaba limitada por la raíz cuadrada del incremento temporal. Esto es, la varianza estadística de la serie temporal de cotizaciones diarias era una función inversa del cuadrado de la amplitud muestral u horizonte histórico considerado (Walter, 1996: 875-880).

Los profesionales de la industria de servicios de asesoría de inversiones no recibieron con demasiado entusiasmo los trabajos empíricos de Working y otros (Cowles, Kendall), cuyas estimaciones estadísticas se consideran hoy más o menos consistentes con el modelo del movimiento browniano de Bachelier (aunque su *Théorie de la spéculation* sólo fue conocida mucho más tarde en la academia americana, siendo al parecer Paul Samuelson quien lo “descubrió” en 1963). La hipótesis del paseo aleatorio de los precios fue rechazada al unísono por los partidarios de los dos métodos tradicionales de valoración de acciones. Mientras que los defensores del análisis “fundamental” de los factores de rendimiento económico de las empresas no podían aceptar la conclusión última de la hipótesis -que los inversores pueden prescindir totalmente de los servicios de asesoramiento experto y aun así ganar dinero-, los practicantes del análisis técnico de tendencias en los precios (conocidos como “chartistas”) se negaban a creer que los movimientos futuros de la bolsa fuesen completamente impredecibles.

El ambiguo sentido teórico del modelo del viaje aleatorio fue por fin “clarificado” en 1965 en un famoso artículo del economista Paul Samuelson publicado en la *Industrial Management Review* (“Prueba de que los precios correctamente anticipados de valores futuros fluctúan aleatoriamente”). Apoyándose ya explícitamente en el modelo del movimiento browniano aritmético de Bachelier, Samuelson proporcionó la primera prueba teórica considerada concluyente de que la hipótesis del paseo aleatorio de los cotizaciones bursátiles no sólo no era contraria a la teoría y la práctica de la valoración competitiva de inversiones, sino que, en un sentido muy preciso, constituía su corolario (Leroy, 1989: 1590-92). El artículo de Samuelson presentaba un test econométrico basado en una arcana variante matemática del movimiento browniano geométrico o difusión log-normal, conocida como *martingala* o modelo de expectativas iteradas que, supuestamente, permitía validar la hipótesis del carácter impredecible de la bolsa (en contra de la opinión de los “chartistas”) y a la vez confirmar la

hipótesis, defendida por los fundamentalistas, de que la eficiencia de los mercados implica el cálculo racional del valor económico futuro de las inversiones empresariales.

“En 1965 formulé un sencillo teorema deductivo del paradigma de la eficiencia del mercado. De acuerdo con el supuesto principal de ese paradigma -“No existen ganancias fáciles”- axiomaticé la noción de que los precios en los mercados especulativos “descuentan” toda nueva noticia disponible mediante el requerimiento de que el precio futuro sea igual a la esperanza matemática condicional del valor futuro de una cierta variable. El valor esperado debe determinarse en relación con algún proceso estocástico exactamente especificado. De ello se sigue que el valor esperado deberá tener, de acuerdo con el proceso estocástico estipulado, una tasa de variación a lo largo del tiempo cuyo valor esperado sea cero.” (Samuelson, 1983: 107-108).

La teoría económica tradicional de la valoración racional de inversiones, tal como fue elaborada en la década de 1930 por analistas bursátiles de la especie “fundamentalista” como John Burr Williams, Benjamin Graham y William Dodd, sostenía que el precio o valor de mercado ‘correcto’ de un activo financiero a de igualar el *valor presente neto descontado* (*discounted net present value*) de sus “fundamentos económicos” (*fundamentals*), esto es, de los ingresos futuros, en forma de dividendos y/o ganancias de capital, a las que su posesión actual da derecho. El valor presente de los ingresos futuros de una empresa se calcula “actualizando” el valor esperado de esos ingresos mediante la aplicación de una tasa de descuento, esto es, un *tipo de interés* que mide lo que los economistas denominan *coste de oportunidad del capital* (o también *preferencia temporal del inversor*): el dinero que es necesario pagar a un inversor para que se avenga a “esperar”, a diferir por un período de tiempo más el cobro de sus beneficios. El tipo de descuento aplicado varía, finalmente, de unos valores a otros según una última variable que se conoce como “riesgo sistemático”. Así, los activos más volátiles en relación con los movimientos agregados del mercado pagan una prima de riesgo que, al incrementar su tasa de descuento, reduce su valor presente en el mercado.

Según el modelo de Samuelson, para calcular de forma racional el valor presente neto descontado de los activos de capital, los inversores se basan en toda *nueva* información -tanto de carácter público como de carácter privado- que llega a sus oídos sobre cambios *relevantes*<sup>8</sup>

---

<sup>8</sup> El modelo de Samuelson, que no dice cómo cuantificar correctamente informaciones ambiguas del tipo “los consumidores han perdido confianza en nuestros productos”, tampoco ofrece ninguna ayuda a la hora de distinguir un dato relevante de otro irrelevante. El análisis de los procedimientos heurísticos empleados por los inversores para resolver estos y otros problemas de percepción e interpretación de la información, emprendido en los años 80 por el programa de investigaciones conocido como *behavioral finance* ha permitido explicar, mediante la introducción de hipótesis auxiliares importadas de la psico-sociología cognitiva, algunas de las más graves anomalías empíricas del modelo de mercados eficientes, como el conocido fenómeno de la “sobre-reacción” del mercado (*market overreaction*) a los anuncios de resultados hechos públicos por las

ocurridos en el estado presente de las cuentas y/o los planes de futuro de las empresas cotizadas en el mercado. A continuación Samuelson introduce el siguiente razonamiento: toda información *novedosa* de este tipo ha de ser, por definición, *aleatoria* en el sentido de la teoría estadística de la decisión, en la medida en que no puede ser correctamente pronosticada mediante cálculos que extrapolan informaciones pasadas (pues si pudiese serlo no sería considerada realmente “novedosa” por quienes fueron capaces de pronosticarla). El argumento concluye que la incorporación inmediata, a través del cálculo racional del valor presente neto descontado, de la información novedosa económicamente relevante en los precios de mercado produce el resultado aparentemente sorprendente que había sido detectado bajo la hipótesis del paseo aleatorio: los movimientos a corto plazo de las cotizaciones presentan una total independencia desde el punto de vista probabilístico. O, lo que es lo mismo, el valor predictivo de la información almacenada en los precios pasados es cero.

#### La teoría de selección de carteras: utilidad, riesgo y precio

En realidad, la camisa de fuerza analítica que ha supuesto tradicionalmente para la teoría matemática de las finanzas de ascendente neoclásico el dogma matemático de la suave continuidad diferenciable que supuestamente debe regir el desenvolvimiento temporal “normal” de la función riesgo/rentabilidad en la valoración competitiva de inversiones, sólo llegó a imponerse efectivamente en este campo intelectual a partir de un trabajo clásico sobre la diversificación del riesgo en la formación de carteras de valores bursátiles publicado en 1952 en la revista *The Journal of Finance* por el economista y estadístico matemático Harry Markowitz (Bernstein, 1992: 41-60).<sup>9</sup> Si el modelo de la martingala de Samuelson es considerado el primer sillar del imponente edificio actual de la teoría matemática de las finanzas, al trabajo de Markowitz se le atribuye el valor de haber realmente sentado las bases econométricas para la práctica profesional del programa de la nueva economía financiera neoclásica.

En primer lugar, el modelo econométrico de selección de carteras óptimas (*optimal portfolio selection*) en base a parámetros estadísticos ‘objetivos’ de rentabilidad (rendimientos

---

empresas cotizadas (Thaler y DeBont, 1985).

<sup>9</sup> Trabajo por el que fue galardonado con el Premio Nobel de Economía de 1991, que compartió con sus colegas William Sharpe y Merton Miller.

netos medios de las inversiones a plazo) y riesgo financiero (varianza estadística de los rendimientos netos) de Markowitz no hacía sino importar al ámbito de los estudios financieros la teoría económica neo-bernoulliana de la toma racional de decisiones en condiciones de incertidumbre, el modelo MUSE (Maximización de la Utilidad Subjetiva Esperada) desarrollado ocho años atrás por John von Neumann y Oskar Morgenstern en su obra *Theory of Games and Economic Behavior (Teoría de juegos y comportamiento económico)*. La relación estadística estable (covarianza) entre el rendimiento y el riesgo financiero definida por el modelo de selección óptima de carteras de Markowitz introduce de hecho, en el dominio casuístico y estrictamente descriptivo que eran tradicionalmente los estudios financieros y empresariales, la férrea disciplina de explicación y predicción probabilística que impone el estándar microeconómico neoclásico entonces emergente. La maximización de la utilidad subjetiva esperada de Morgenstern y von Neumann define un criterio normativo de racionalidad en base al cual el analista ordena los comportamientos empíricos de los agentes económicos que operan en los mercados financieros según su grado de consistencia con el estándar analítico.

Aunque el principal atractivo del modelo de Markowitz era ofrecer una medida objetiva del riesgo y la utilidad financiera sobre la base de parámetros cuantitativos de media y varianza estadística de los rendimientos temporales de las inversiones (tal como pueden deducirse de la evolución diaria de las cotizaciones públicas en las bolsas organizados de valores)<sup>10</sup>, las condiciones técnicas y económicas de posibilidad de dicha medida estaban aun muy lejos de haberse alcanzado en los años 50. Fueron los trabajos posteriores sobre las condiciones microeconómicas del equilibrio estático en los mercados financieros llevados a cabo por su discípulo William Sharpe, así como por otros economistas como James Tobin, John Lintner, Jack Treynor y Jan Mossin, quienes propusieron una serie de hipótesis auxiliares y métodos de reducción econométrica que hicieron posible escribir modelos simplificados de cálculo para hallar los tipos de descuento y las primas de riesgo empíricas de los valores de inversión a un coste de computación aceptable (Bernstein, 1992: capítulo 10). En primer lugar, James Tobin, otro futuro Premio Nobel de Economía de la Universidad de Yale, aplicó el concepto keynesiano de *preferencia por la liquidez* al estudio de los precios bursátiles. El llamado ‘teorema de separación’ de Tobin establecía que la hercúlea tarea de selección de carteras óptimamente diversificadas planteada inicialmente por Markowitz se correspondería en

---

<sup>10</sup> Desde Markowitz se hablará de “eficiencia en media-varianza” (*mean-variance efficiency* o *MV-efficiency*) de los mercados, la primera metodología realmente operativa para cuantificar el desempeño de la racionalidad especulativa en un ambiente de grandes números (Walter, 1996: 882-885).

mayor medida con la práctica empírica de la gestión profesional de carteras si cada inversor pudiese elegir, dentro de una cartera de valores dada, la proporción idiosincrásica entre valores de renta variable (acciones) y valores de renta fija (bonos de deuda pública), que maximizara su utilidad subjetivamente esperada. Esto es, que ofreciese un nivel de rentabilidad acorde con sus preferencias y aversiones personales en materia de riesgo, asociadas a su vez, según el modelo clásico del *homo economicus*, con su nivel de ingreso, edad, nivel educativo, expectativas profesionales, etc. Al dotar a los activos dichos “libres de riesgo” (como los bonos de deuda pública) de una ponderación *subjetiva* de nivel superior a la de las acciones, el truco o atajo metodológico ideado por Tobin con su teorema de separación permitió liberar a las reglas de selección de carteras óptimamente diversificadas de su dependencia excesiva respecto de los pesados cálculos estadísticos necesarios para determinar la gigantesca matriz de covarianzas definida en el modelo original de Markowitz. Cálculos cuyo coste de computación era, por otra parte, absolutamente prohibitivo en una época donde justamente la industria del circuito integrado comenzaba a dar sus primeros y tímidos pasos, y en la que los únicos ordenadores electrónicos disponibles en universidades y empresas, aun en las cavernas del transistor y la resistencia, tenían una potencia de procesamiento infinitamente menor que la del *chip* más sencillo instalado hoy en cualquier aparato electrodoméstico.

Incluso el modelo de selección de carteras simplificado de Tobin era todavía difícilmente implementable en la práctica cotidiana de las empresas de gestión de fondos, tanto a causa de la enorme incertidumbre que implicaba la realización manual de los numerosos cálculos aritméticos necesarios, como del propio coste en tiempo y dinero de los mismos.<sup>11</sup> Habría que esperar aun a un artículo de 1964, donde se hacían públicas las enmiendas al modelo de Markowitz/Tobin planteadas por un joven estudiante de la Universidad de UCLA, William Sharpe, cuya tesis doctoral de 1962 había dirigido el propio Markowitz, para que la industria de servicios de inversión pudiese hacer por fin uso de los resultados de la investigación académica sobre el problema de la diversificación de riesgos. La contribución original del trabajo de Sharpe

---

<sup>11</sup> En 1966 el economista William Baumol estimó que la sencilla tarea de computar una solución numérica para una versión reducida (para un único valor) de un modelo media-varianza de valoración inspirado en la teoría de la selección eficiente de carteras de Markowitz, costaría entre 150 y 300 dólares de la época. Un coste que excedía ampliamente la utilidad económica esperada que cualquier firma de inversiones atribuiría uso de la tan buscada cifra para fines de negociación bursátil. El coste económico actual de llevar a cabo esa misma operación de cálculo con la ayuda de los ordenadores de última generación disponibles para uso personal y empresarial es prácticamente despreciable. Aparte de reducir los costos pecuniarios de la computación de los modelos matemáticos de valoración, la rápida evolución reciente de las tecnologías de procesamiento electrónico de datos ha reducido también el tiempo de reloj requerido para computar la solución de este tipo particular de modelos de valoración de equilibrio, desde un promedio estimado de 33 minutos en 1965 hasta 30



consistió en proporcionar una fórmula econométrica para medir el factor de riesgo sistemático o no diversificable que actúa de forma conjunta sobre todos los valores que cotizan en un mismo mercado. Al igual que el teorema de Tobin permitía distribuir de forma óptima los componentes de renta fija y los de renta variable de una cartera de valores, la medida de Sharpe permite a su vez hacer distinciones en función del riesgo dentro del componente de renta variable.

Como hemos visto hace un momento, el tipo de descuento que permite calcular el valor presente neto descontado de los beneficios esperados en el futuro, es considerado por la teoría neoclásica de valoración de bienes de capital una función del tipo de interés y del riesgo inversor. A su vez el riesgo inversor de cada valor puede descomponerse analíticamente en dos elementos bien diferenciados: el riesgo diversificable o idiosincrásico y el riesgo no diversificable o sistemático, que es aquel que afecta de manera similar la marcha de las acciones de empresas cuyos negocios pueden ser muy diferentes. Al contrario que los riesgos idiosincrásicos, que tienen su origen en las variables productivas singulares de cada empresa y que pueden ser minimizados mediante la estrategia combinatoria de la formación de carteras, la reducción de los riesgos sistemáticos de un valor, se resiste en mucha mayor medida a las estrategias microeconómicas de diversificación de carteras pues está producido por la acción de variables de tipo meso y macroeconómicas, como la localización geográfica de la producción, el desarrollo tecnológico de los distintos sectores industriales, la productividad de la mano de obra, el estado de la demanda de consumo o los impuestos.

El modelo CAPM (*Capital Assets Pricing Model*) de valoración de activos de capital desarrollado por Sharpe definía el componente de riesgo realmente relevante para la valoración racional de una acción como el coeficiente de covarianza entre las fluctuaciones de un valor individual cualquiera y el comportamiento del factor o componente principal de la volatilidad del mercado, que en general se asocia empíricamente con el movimiento de algún índice de valores representativo de la cartera total del mercado (Dow Jones Industrial, Standard and Poor's 500, Nikkey, Dax, etc.) Esta fórmula de medición del factor de riesgo principal de cada inversión, conocida como “beta de Sharpe” y que se haría tremendamente popular entre los asesores profesionales de inversiones durante la década de los 70, lo que hace, en la práctica, es reproducir el teorema de separación de Tobin en el interior del componente de renta variable de la cartera óptimamente diversificada y simplificar al máximo el modelo de eficiencia en media-varianza de Markowitz y hacer su cálculo inversor accesible a los intermediarios del mercado.

Efectivamente, en vez de cruzar la varianza de cada valor con la de cada uno de los demás como pretendía Markowitz, el modelo de Sharpe asumía la existencia, en paralelo con el tipo de interés, de una variable macroeconómica de impacto directo, aunque diferencial, sobre la cotización de cada empresa individual. El indicador empírico que mejor permite aproximar la estructura de variación de este factor oculto de fluctuación macroeconómica es, según Sharpe, el movimiento del índice agregado del mercado bursátil.

### Arbitraje y equilibrio

En el tercer estadio del desarrollo de la teoría económica de los mercados eficientes de capital, se configurará un modo de entendimiento más general y comprensivo del equilibrio general de precios financieros. Esta tercera línea de investigación sustituirá la clásica intuición de la independencia probabilística por la intuición más fundamental de la *imposibilidad de arbitraje*, de la que se deriva ulteriormente la primera como condición de segundo orden. Y permitirá, en última instancia, desarrollar una variante inclusiva de los modelos CAPM, el modelo APT (*Arbitrage Pricing Theory*) de valoración mediante arbitraje, que clasifica los perfiles de riesgo rentabilidad de los activos de inversión a partir de los varios factores agregados o componentes principales que intervienen en la volatilidad sistemática de los precios de mercado (tasas de inflación, volatilidad de tipos de interés, movimiento de los índices de distintos mercados, etc.).

El principio teórico de la condición de no-arbitraje<sup>12</sup>, se expresa de forma sencilla: la aparición de desfases informacionales entre distintos mecanismos de determinación del precio de un mismo valor crea oportunidades de arbitraje en el mercado. Es decir, hace que sean posibles estrategias de inversión particulares (arbitrajes racionales) que pretenden “conseguir algo a cambio de nada”<sup>13</sup> es decir, obtener beneficios seguros *a priori* sin asumir riesgos adicionales. Dicho de otro modo, la especulación racional se hace posible cuando se incumple el principio económico clásico (*the law of one price*) que dice que cada mercancía particular debe tener un único precio de mercado y sólo uno. En esta situación, la función de exceso de demanda del “dinero inteligente” (*smart money*) tenderá a infinito para el precio

---

<sup>12</sup> Cuya formulación puede remontarse a los *Principios matemáticos de la teoría de la riqueza* [1838] del economista francés Antoine Augustin Cournot

<sup>13</sup> En la jerga angloamericana de la academia y los mercados financieros internacionales se habla de conseguir

más bajo (comprar barato) y lo mismo sucederá con su función de oferta para el precio más alto (vender caro). De modo que el precio de equilibrio se restablece gracias a la completa elasticidad-precio de las funciones de utilidad de los especuladores racionales o *arbitrageurs*.

El principio de la completa independencia probabilística entre las fluctuaciones sucesivas de los precios en el corto plazo se muestra ahora como uno más de los efectos secundarios derivados de la ausencia de oportunidades de arbitraje. La formulación de predicciones globales consistentes a partir de informaciones locales es completamente imposible, porque en un estado libre de arbitrajes los precios finales de los bienes son independientes de las trayectorias transaccionales particulares que los determinan (*path-independent*). Esto es, en un estado tal no puede nunca acumularse información relevante para la determinación de los precios de equilibrio futuros en los resultados de ninguna transacción individual pasada. La ausencia de oportunidades de arbitraje es así condición para la existencia de precios de equilibrio en el mercado. Y el ‘equilibrio’ es reinterpretado finalmente como un estado peculiar del mercado en el que, a través de la condición de imposibilidad de arbitraje, lo que se cumple esencialmente es el “teorema de la aditividad del valor”, trasunto matemático del principio económico clásico de *la conservación del valor a través del intercambio*.

Las bases teóricas para la fundamentación formal de la intuición de imposibilidad de arbitraje como bastión de la eficiencia informacional de los mercados financieros habían sido sentadas a finales de los 50 por dos famosos artículos conjuntos de los economistas Merton Miller y Franco Modigliani sobre la (no)influencia de los modos de financiación alternativos de las inversiones de una empresa sobre su valor de mercado (Harrison, 1998: 180-182).<sup>14</sup> No fue

---

un “desayuno gratis” (a *free lunch*).

<sup>14</sup> Las aportaciones principales de Miller y Modigliani (conocidas como ‘MM hipótesis’) versaban sobre: (a) la importancia determinante de la capacidad real del negocio empresarial para generar ingresos futuros y del nivel de riesgo con ella asociado como únicos factores efectivos del coste del capital empresarial; y (b) la completa neutralidad económica de las decisiones estratégicas de los administradores sobre la estructura financiera de la empresa (nivel de apalancamiento de la inversión o *ratio* acciones/obligaciones emitidas) y la gestión financiera de su crecimiento (reparto de dividendos *versus* capitalización interna). Las contraintuitivas afirmaciones de M & M sobre el completo aislamiento de las actividades reales de una empresa respecto de sus actividades nominales eran en realidad el resultado de aplicar a la modelización del proceso de valoración del capital empresarial en el contexto de mercados competitivos los argumentos matemáticos más básicos del método ingenieril de la programación lineal introducido en la investigación económica por Leonid Kantorovich y Tjalling Koopman en la década de los 40 y aplicado posteriormente a la elaboración de un modelo neo-walrasiano de equilibrio económico general con precios de subasta por Arrow y Debreu (Rubio Irigoyen, 1993: 48ss.) Esta afinidad de espíritu con los nuevos modelos emergentes de la teoría económica neoclásica del equilibrio general competitivo desarrollada durante los años 50 es sin duda alguna la razón por la cual los modelos del coste de capital y la financiación empresarial de Miller-Modigliani suelen ser consideradas en la actualidad pioneros del decisivo cambio de enfoque que habría de transformar el estudio pre-científico, casuístico y descriptivo de la estructura financiera de las empresas (*business finance*) en la nueva ciencia del análisis económico de las finanzas (*financial economics*) (Miller, 1988; Bernstein,

sin embargo hasta principios de la década de 1970 cuando el principio de imposibilidad de arbitraje pasó a constituirse en un candidato legítimo para ocupar el núcleo duro de la teoría financiera junto con la hipótesis del viaje aleatorio. Las otrora discutidas tesis de Miller-Modigliani encontraron un poderoso revitalizante en la nueva estirpe de modelos de equilibrio parcial elaborados por una segunda generación de economistas matemáticos, como los profesores Stephen Ross y Richard Roll, quienes aplicaron el principio de arbitraje al diseño de un modelo aplicado de valoración de inversiones conocido como Modelo de Valoración Mediante Arbitraje (APT).

Este modelo aplica de técnicas probabilísticas de factorización sobre un conjunto de variables micro y macroeconómicas para determinar el grado de riesgo o sensibilidad estadística del precio de diferentes activos de inversión respecto de los cambios observados en un conjunto de tres, cuatro o como mucho cinco factores económicos fundamentales, en general la evolución del tipo de interés, del PIB y de algún índice bursátil representativo y el movimiento de algún “fundamento económico” específico, como el nivel de déficit público (para la deuda pública y las divisas) o el índice de precios industriales (para las acciones empresariales). El modelo APT se aplica hoy de forma generalizada en la industria de servicios de valoración y compraventa de inversiones para conducir una clase de operaciones de mercado conocidas como operaciones de *valor relativo* en las que el inversor apuesta, no por la subida o la bajada de la cotización de determinado valor, sino por la convergencia futura en cuanto a perfil de riesgo de los precios de inversiones de similares características. A diferencia de la forma clásica de arbitraje ‘directo’ donde el arbitrajista obtenía un beneficio seguro, libre de riesgos, aprovechándose de la existencia efectiva de discrepancias entre los precios simultáneos de compra y venta de una misma mercancía, las operaciones de valor relativo o arbitrajes ‘teóricos’ consisten en desprenderse de aquellas inversiones que se consideran caras *en relación con los precios de equilibrio que arroja el modelo factorial*, esto es, aquellas inversiones para las cuales el modelo econométrico *predice* que su precio deberá bajar en un futuro más o menos próximo cuando se restablezcan las relaciones de equilibrio en el mercado, y comprar aquellas que, en ese mismo marco teórico, se consideran ‘baratas’.<sup>15</sup> En realidad, como veremos en el capítulo 4 cuando analicemos los problemas del fondo de cobertura Long-Term Capital Management, el

---

1992: capítulo 9; Harrison, 1998: 180-181).

<sup>15</sup> “Cuando se habla hoy de arbitraje financiero no se trata ya de arbitraje *stricto sensu* [arbitraje directo] sino de operaciones que resultan de estimaciones indirectas que hacen a aparecer o tal o cual producto como sobrevalorado o infravalorado con relación a tal otro. Estas estimaciones suponen en realidad una modelización de las equivalencias postuladas entre productos financieros distintos, siendo la debilidad eventual de sus valores

problema esencial de los modelos matemáticos de arbitraje financiero y de las operaciones de valor relativo es la absoluta imposibilidad de determinar formalmente la longitud o ‘medida característica’ del *horizonte temporal* para el cual deberían restablecerse las relaciones de equilibrio.<sup>16</sup>

### **El azar y el ‘precio justo’: la teoría matemática de la valoración de opciones de Black-Scholes-Merton**

La nueva alianza que, a principios de la década de los 70, establecieron los economistas financieros neoclásicos con los formalismos matemáticos importados de la física mecánico-estadística del equilibrio termodinámico y con la potencia de cálculo desatada de los nuevos ordenadores electrónicos, hizo posible que la teoría económica abstracta de la diversificación de carteras y la valoración competitiva pudiese llegar a encarnarse en una multiplicidad de técnicas productivas concretas. Las tecnologías matemáticas de los ingenieros financieros se han aplicado sucesivamente desde entonces a la valoración y la “síntesis” artificial de derivados financieros, la mecanización de estrategias de inversión y la supervisión de riesgos financieros globales en tiempo real. El paradigma de este nuevo tipo de tecnologías es una familia de modelos matemáticos de determinación competitiva de precios, las fórmulas de valoración de opciones financieras, que el historiador Peter L. Bernstein ha denominado “la máquina financiera universal” (*the universal financial device*). Dos de los investigadores pioneros en el campo de la teoría de valoración de opciones, los profesores Myron Scholes, actualmente en la Graduate School of Business de la Universidad de Stanford, y Robert C. Merton, de la Harvard Business School, fueron galardonados por la Academia Sueca de Ciencias con el Premio Nobel de economía de 1997.

El problema de cálculo económico que se propusieron resolver las primeras investigaciones sobre la matemática de los derechos contingentes (*contingent claims*) sobre valores financieros a principios de los 70, era el de la correcta estimación del valor económico “objetivo” –entendido, al modo de la teoría económica neoclásica, como el precio “de equilibrio” que despeja el mercado por ambos lados, que acaba con el exceso/defecto de oferentes/demandantes- de un tipo particular de contrato legal que había comenzado

---

una consecuencia del nivel de adecuación empírica de los modelos.” (Jorion, 1994: 313).

recientemente a comercializarse en las bolsas estadounidenses: un contrato que otorga a su poseedor la opción de vender (*put*) o de comprar (*call*) un valor de inversión determinado (acciones, bonos, índices, divisas, etc).

El problema puede plantearse de la forma siguiente: se trata de calcular la cantidad o ‘prima’ de dinero que se debe pagar a un intermediario financiero (un banquero) que vende a un inversor particular el derecho a transferirle al banco del primero, a lo largo de un período de tiempo dado, el riesgo de variación de precios al que está sujeto un activo o una cartera de valores de su posesión. El contrato de opción le otorga al agente comprador el derecho legal, *pero no el deber*, de venderle el activo al banquero en una fecha futura a un precio prefijado de antemano, lo que se conoce como “precio de ejercicio” (*striking price*). Si, a lo largo del período que cubre el contrato, el precio del activo cae por debajo del precio de ejercicio prefijado, será beneficioso para él ejercitar el derecho que le concede el contrato de opción y venderle el activo devaluado al banquero a su precio de aceptación obligada, el precio de ejercicio, que es superior a su precio de mercado actual.

La restricción esencial, como acabamos de ver, de toda la moderna metodología de valoración de bienes de capital basada en el argumento del equilibrio de mercado es la sujeción del resultado final a la condición de no-arbitraje o ley del precio único: para no incurrir en pérdidas seguras *a priori* el banquero debe calcular el precio correcto del contrato que vende de modo que esté en línea con los demás precios que se fijan en el mercado para productos de inversión sustitutivos (en especial con el tipo de interés que pagan los títulos de deuda pública libres de riesgo). Esto es, que sea a la vez ajustado (no demasiado barato) y competitivo (no demasiado caro).

El modelo económico original presentado por los profesores Fisher Black (entonces en el MIT) y Myron Scholes (entonces en la Universidad de Chicago) en un famoso artículo publicado en 1973 en el *Journal of Economic Theory*, la revista publicada por el departamento de economía de la Universidad de Chicago, para enfocar de forma objetiva este problema de valoración, consistía en una sencilla expresión algebraica que establecía una relación de determinación funcional entre el valor económico del contrato de opción (eg. el precio o prima que debe recibir el intermediario o asegurador que vende el contrato de opción a cambio de hacerse cargo del riesgo de precios que le transfiere el comprador del mismo) y un conjunto de cinco variables independientes o parámetros económicos fundamentales: (a) la cotización del

---

<sup>16</sup> Para una temprana observación metodológica a este respecto véase Mandelbrot (1971).

activo subyacente, (b) el precio de ejercicio de la opción, (c) el tipo de interés, (d) la duración del contrato y (e) la 'volatilidad' del activo subyacente (Black y Scholes, 1973). El mercado proporciona información directa sobre cuatro de estos factores y tan sólo uno, la volatilidad, el riesgo de fluctuación del activo subyacente, es desconocido para el analista.

La fórmula original de Black-Scholes para el cálculo del precio de una opción *put* de tipo europeo (una opción de venta que sólo puede ejercitarse en la fecha de su vencimiento) era esta:

$$C = S N(d_1) - E e^{-R_f T} N(d_2)$$

para

$$d_1 = \frac{\ln(S/E) + [R_f + (1/2) \sigma^2] T}{\sigma T^{1/2}}$$

y  $d_2 = d_1 - \sigma T^{1/2}$

Donde  $C$  es el precio de la prima (el valor económico del contrato de opción). Los parámetros o variables económicas fundamentales que intervienen en la fórmula de valoración de opciones de Black-Scholes son cinco:  $S$ , el precio del activo subyacente (la cotización contemporánea de una acción, un índice bursátil, un futuro sobre un índice, etc);  $T$ , el tiempo de vida del contrato de opción (días, meses o años);  $E$ , el precio de ejercicio de la opción (el precio acordado de compraventa futura);  $R_f$  el tipo de interés del activo libre de riesgo (la rentabilidad actual de las letras del tesoro o los bonos de deuda pública) y  $\sigma$ , la volatilidad del subyacente definida como el valor normalizado de dispersión estadística (la desviación standard) de las fluctuaciones temporales sufridas por su valor de cotización medio;  $N(d_1)$ ,  $N(d_2)$  son los valores acumulados de la distribución normal de probabilidad para  $d_1$  y  $d_2$  respectivamente.

Despejando uno a uno los términos de la ecuación de valoración de opciones de Black-Scholes, es posible obtener una serie de fórmulas secundarias para calcular los coeficientes de riesgo financiero de segundo orden, conocidos como parámetros riesgo o ‘sensibilidad’ de una opción, que miden el grado de interacción existente entre la prima de la opción y cada una de las cinco variables independientes que intervienen en la fórmula. Los cinco parámetros básicos de sensibilidad o riesgo de una opción son: (1) la *delta* que mide la elasticidad de la prima de la opción ante variaciones en el precio del subyacente; (2) la *theta*, que mide la elasticidad del precio de la opción respecto de variaciones en el tiempo de vencimiento del contrato; (3) la *vega* (o *kappa*), que mide la elasticidad de la prima respecto a variaciones en la volatilidad del subyacente; (4) la *rho*, que mide la elasticidad de la prima respecto de variaciones en el tipo de interés del activo libre de riesgo; y (5) la *gamma*, que se define como la “delta de la delta” y mide la elasticidad de la delta ante variaciones del precio del subyacente -la *gamma* es quizá el parámetro de riesgo más fundamental porque informa del grado de convexidad o no linealidad que caracteriza la relación subyacente-derivado.<sup>17</sup>

El primero y más fundamental de los parámetros de riesgo de la opción, la *delta*, se define matemáticamente como la primera derivada parcial de la prima de la opción con respecto al precio del activo subyacente. Para una opción de compra (*call*) el valor de la delta varía en el intervalo entre 0 y 1. Cuando la opción se halla ampliamente desvalorizada por el mercado, o como dicen los operadores de opciones en su jerga “muy fuera del dinero” (*out-of-the money*), esto es, cuando la cotización está muy por debajo del precio de ejercicio, el valor de la delta es 0, lo que quiere decir que el valor de la opción es muy inelástico con respecto a pequeñas variaciones en la cotización del subyacente -una pequeña variación de la cotización no modifica para nada la posición de la opción fuera del dinero. Cuando la cotización del subyacente se aproxima al precio de ejercicio de la opción, el valor de la delta se aproxima al valor 0.5, de suerte que una variación de un punto en la cotización del subyacente se traduce en una variación de 0.5 puntos en la prima de la opción. La elasticidad es máxima (delta = 1) cuando la cotización del subyacente supera con creces el precio de ejercicio y la opción se halla muy dentro del dinero (*deep-in-the-money*), con lo que cada subida de un punto de la cotización se ve correspondida por una subida de un punto en la

---

<sup>17</sup> Para las fórmulas de cálculo correspondientes de todos estos parámetros vid. Lamothe (1993: 129-146).



prima de la opción. Para una opción de venta (*put*) la delta varía entre -1 (elasticidad máxima) y 0 (inelasticidad máxima). En este caso el valor máximo de elasticidad es negativo con respecto a la cotización del subyacente porque la opción *put* estará *deep-in-the-money* (y por tanto su delta se aproximará a -1) cuando el valor de mercado del subyacente se halle muy por debajo del precio de ejercicio de la opción.

#### Reglas de cobertura de riesgos en el modelo de Black-Scholes

En segundo lugar, a partir del cálculo de los parámetros de sensibilidad de una opción en el modelo de Black-Scholes se pueden derivar reglas óptimas de cobertura (*hedging*) de inversiones que permiten al banquero que vende el contrato de opción ‘reasegurar’ de forma completa en el mercado el riesgo de precios adquirido del comprador de la opción. Las reglas de cobertura de una opción de Black-Scholes funcionan del modo siguiente: una vez hallado el valor teórico de la prima de la opción mediante la aplicación de la fórmula matemática anterior, el banquero, que lo que está vendiéndole en la práctica a su cliente es un contrato de seguro contra la variación de las cotizaciones bursátiles (Fernández Izquierdo, 1996: 83), debe emplear el monto de la prima para construirse un reaseguro que le cubra completamente contra el riesgo de precios que le ha transferido el comprador de la opción. Los ingresos obtenidos por el banquero por la venta del contrato de opción (iguales al valor teórico de la prima) deben invertirse en la construcción de una cartera de cobertura formada por participaciones en el activo subyacente de la opción y en bonos de renta fija libres de riesgo (pe. letras del tesoro).

En su artículo original Black y Scholes proponían usar una regla de arbitraje entre diversos valores existentes en el mercado que asegure al banquero que, para cualquier cotización futura del activo subyacente de la opción, sus pérdidas esperadas al expirar el contrato serán cero. Esta regla de cobertura se conoce con el nombre de cobertura delta (*delta hedging*) o más exactamente *cobertura delta-neutral*, y afirma el criterio de que, para cubrirse contra las pérdidas que pudiera generarle el ejercicio del derecho de opción por parte del asegurado, el banquero debe construir una cartera de valores cuyo perfil de riesgo sea tal que compense o ‘neutralice’ la *delta* de la opción que vendió. Esta cartera ‘delta-neutral’ (también denominada cartera-réplica) está construida de tal modo que, cualquiera que sea la fuerza de interacción existente entre el precio del activo subyacente y el del contrato de

opción iniciales, el banquero vendedor de la opción y comprador de la cartera-réplica obtiene exactamente el mismo perfil de riesgo-rendimiento que el propietario de la opción. Dicho de otro modo, la estrategia de cobertura delta-neutral garantiza al banquero que, cualesquiera sean las circunstancias de precio del subyacente bajo las que el cliente decida ejercitar su derecho de opción -y especialmente en aquéllas condiciones más ventajosas para el cliente, esto es, cuando la opción se halle profundamente metida en el dinero (*deep-in-the-money*)-, podrá hacer frente a sus obligaciones sin desembolso adicional alguno aparte de la prima de aseguración cobrada inicialmente.

La regla matemática de Black-Scholes para la construcción de una cobertura delta-neutral para reasegurarse por la venta un contrato de opción, establece que la proporción que debe ocupar el activo subyacente (o un activo equivalente: por ejemplo una opción de sentido inverso) en la cartera-réplica del banquero viene dada por la llamado *ratio de cobertura* que se calcula en base al valor de la *delta* de la opción original. Así, si la *delta* de una opción es 0.6, la *ratio* de cobertura será del 60%, con lo que para construir su cartera de cobertura el banquero deberá invertir el 60% del monto ingresado por el cobro de la prima de la opción en participaciones del activo subyacente y el 40% restante en letras del tesoro. Finalmente, la estrategia de cobertura de la opción debe tener un carácter *dinámico*: como cualquier cambio registrado en la cotización del subyacente modifica temporalmente el valor de la *delta* - puesto que la elasticidad-precio de la opción es función de la distancia existente entre la cotización actual y el precio de ejercicio- y por tanto el valor de la *ratio de cobertura*, debe producirse, *inmediatamente a continuación del suceso registrado*, un reequilibramiento compensatorio de la proporción relativa entre valor subyacente (acciones) y activo libre de riesgo (letras del tesoro) en la cartera-réplica. Para preservar así -idealmente en tiempo continuo (Merton, 1986a [1973])- el carácter neutral respecto del valor de la *delta* de la cartera de cobertura, y por tanto la eficacia de la estrategia de reaseguro.

## Aleatoriedades

*La de aleatoriedad es una idea intrínsecamente difícil puesto que parece chocar con hechos e intuiciones muy poderosas. Si en física choca con la idea de determinismo, en finanzas choca con las ideas de causalidad clara, racionalidad económica y tal vez libre albedrío... En física el problema parece estar mitigado por el hecho de que los átomos de un gas no se conocen de forma individual, mientras que en finanzas el problema se agrava por exactamente la razón opuesta. Peor aún, en finanzas es difícil desenredar*

Junto con la aplicación del principio de arbitraje al problema de valoración de un contrato de opción, la otra innovación intelectual, y por el mérito científico fundamental de la fórmula de Black-Scholes fue el modelo matemático propuesto para calcular el componente último y más decisivo de la igualdad ecuacional: la *volatilidad* de los precios.

“La fórmula [de Black y Scholes] no hace intervenir la probabilidad de que las cotizaciones suban o bajen, sino tan sólo lo que se llama su 'volatilidad', es decir, su trayectoria más o menos accidentada. De manera que no se pide a los operadores que hagan predicciones, ni siquiera estadísticas, sobre la evolución de las cotizaciones de las acciones; *se les pide que se pongan de acuerdo sobre el valor de su volatilidad*, es decir, en definitiva, que identifiquen uno de los parámetros que rigen al movimiento browniano. Este resultado tan notable está en la base de toda la teoría moderna de las finanzas y ha popularizado el movimiento browniano entre personas que no se creían destinadas a practicar la matemática.” (Ekeland, 1992: 181)

Para modelizar matemáticamente el proceso instantáneo de irradiación de riesgo asociado con el fenómeno estadísticamente observable de la variabilidad o ‘volatilidad’ a corto, medio y largo plazo de los valores de inversión en los mercados financieros, Black y Scholes emplearon una ecuación de fluctuación estocástica en tiempo discreto conocida como proceso de Kolmogorov-Wiener-Gauss. Más exactamente, lo que hicieron Black y Scholes en su artículo de 1973 fue considerar, a partir de la teoría de los mercados eficientes que se comportan como ‘martingalas’ formulada por Samuelson (véase *supra*), que el patrón de fluctuación (la volatilidad) del activo subyacente está regido por un movimiento browniano geométrico, un tipo de ecuación estocástica en diferencias (tiempo discreto) que implica que tanto la rentabilidad esperada como la volatilidad del activo subyacente son constantes. La fórmula permite así asignar, para un intervalo de confianza dado, una probabilidad numérica estable al suceso relevante: que la cotización fijada por el mercado llegue en algún momento a lo largo del tiempo de vida del contrato a superar el precio de ejercicio pactado de antemano por las partes -v.g. el precio que permite obtener ganancias de capital ejecutando el derecho de opción.

Mientras que Black y Scholes definían la volatilidad o riesgo de fluctuación de un valor financiero de forma *estática* como la varianza estadística instantánea de un movimiento browniano geométrico en tiempo continuo, Robert C. Merton, por su parte, en un artículo publicado en 1973 en el *Rand Journal of Economics* titulado “Una teoría racional para la valoración de opciones” (Merton, 1986a [1973]), presentó una fórmula analítica *dinámica* para

medir la volatilidad financiera -y poner precio a los contratos de opción- en tiempo continuo infinitesimal. Importando a la economía financiera un conjunto de teoremas de cálculo diferencial, como el llamado lema de Ito y la teoría de integrales estocásticas, desarrollados por los físicos y los ingenieros procesos para resolver en los valores de disipación energética de procesos naturales termodinámicamente irreversibles, como la irradiación calórica o flujo eléctrico, Merton, ingeniero electrónico de formación, había desarrollado en su tesis doctoral sobre la teoría de valoración de opciones realizada en el departamento de economía del MIT bajo la supervisión de Paul Samuelson, un modelo de valoración de opciones en tiempo continuo que permitía ‘diferenciar’ e ‘integrar’ un proceso estocástico de tipo gaussiano (Merton, 1983).

El problema de modelos de volatilidad financiera como los de Black-Scholes y Merton, como el de la gran mayoría de los modelos estadísticos de las fluctuaciones y el ruido aleatorio empleados por las ciencias sociales empíricas, es que, en su intento de beneficiarse de los supuestos logros alcanzados por sus hermanas mayores las ciencias naturales, no suelen cuestionarse algunos axiomas más controvertidos de la teoría físico-matemática del orden natural, como el que establece que “aleatorio es lo contrario de necesario” o que el “azar se opone a orden”, así como la afirmación de que el carácter aleatorio de los sucesos individuales (el lanzamiento de *una* moneda) se disuelve a escala macroscópica cuando se agrega un número suficientemente grande de sucesos similares (cientos de miles de millones de monedas lanzadas al aire).

La moderna controversia científica y tecnológica sobre los límites lógicos y físicos de las operaciones de computo y su vinculación con la historia de los formalismos matemáticos que tratan de atrapar en su seno el paradójico concepto de aleatoriedad, está en la base de los múltiples dilemas que enfrenta el punto de vista ‘práctico’ del ingeniero interesado en la eficacia observable a corto plazo, esto es, en que ‘la cosa funcione’, cuando ‘la cosa’ es algo tan frágil como la memoria de las cosas. Para el caso concreto de las matemáticas financieras, la mediación creciente de las operaciones de cálculo lógico y aritmético a través de prótesis tecnológicas cada vez más elaboradas como los ordenadores personales y otros dispositivos de computación electrónica, ha tenido como consecuencia inesperada hacer cada vez más patente la corporeidad física y la materialidad económica de la más puramente espiritual y platónica de nuestras actividades intelectuales (Landauer, 1991: 28-29).<sup>18</sup>

---

<sup>18</sup> “A fuerza de confiar a los ordenadores una parte cada vez más importante del cálculo, un día tenían que

## Aleatoriedad físico-matemática: la economía de la computación

En un primer capítulo de la historia moderna del concepto científico de aleatoriedad, disciplinas teóricas como la matemática y la mecánica intentaron atrapar el azar en la telaraña analítica de la teoría clásica de probabilidades (Gigerenzer et. al., 1991). Así, por ejemplo, los teoremas clásicos del cálculo matemático de probabilidades (teorema de los grandes números, teorema ergódico o del “límite central”) tenían como misión romper las simetrías de escala de los fenómenos (todo lo que parece aleatorio a escala micro *debe* ser determinista a escala macro) para poder computar números estables. Posteriormente, las diferentes ciencias experimentales (biología, termodinámica, economía, psicología) han tratado de simularlo tecnológicamente mediante el uso de una extensa variedad de máquinas estadísticas de compresión de datos, cuyas diferentes aplicaciones van desde el diseño de muestras aleatorias a las técnicas modulación de señales de radio para reducir el ruido de fondo (eg. filtro de Kalman) o la simulación informática de procesos estocásticos (métodos de Monte Carlo). Dentro de este segundo momento evolutivo de la historia científica del azar se localiza la *teoría de la complejidad algorítmica*, un cuerpo de investigaciones matemáticas que nació a principios de la década de 1960 como una consecuencia de la aplicación, *estrictamente auto-referente* de la teoría estadística de la información de Shannon a la descripción de la propia estructura informativa de los algoritmos matemáticos.

Como consecuencia, en parte, de la explosión industrial de las tecnologías de la información a lo largo de la década de los 80, la física matemática teórica de los fenómenos termodinámicos fue aplicada a la demostración del carácter irreversible de las operaciones lógicas de procesamiento de datos (Bennett y Landauer, 1985; Bennett, 2003). Una de las conclusiones más interesantes (y sorprendentes) de estas investigaciones sostiene que los ordenadores se calientan en general al borrar información, no al escribirla. Conclusión que se sigue de la hipótesis termodinámica de que las operaciones de “borrado” o destrucción de

---

acabar reivindicando un lugar en la teoría matemática misma. Los esclavos iban a revelarse... El Agente [el operador textual] encargado por el Sujeto [matemático] de hacer en la práctica los cálculos a partir de la única conminación ‘y así sucesivamente’, tiene que hacerlo sin dificultad, sin sudor, sin medios y sin coste... Por primera vez en la historia, el Agente menospreciado encargado de hacer los cálculos sin fatiga y sin gasto de energía se pone a reclamar para funcionar gigabytes, tomas de corriente, ventiladores y miles de millones de pesetas. A la aristocrática orden del Sujeto ‘y así sucesivamente’ el Agente replica a partir de ahora: “¿Cuántos milisegundos? ¿cuántas cifras después de la coma? ¿cuántos dólares?”. (Latour, 1996: 739).

información incurren de manera inevitable en una pérdida energética neta, pues el gasto de alimentación que requiere la destrucción de información supera siempre al ahorro que aporta la lectura de la información previamente escrita.<sup>19</sup> De suerte que el mayor capítulo de gasto energético en el que incurrimos al usar un ordenador se produce durante la fase de su encendido, puesto que al ponerlo en marcha lo que hacemos es reiniciar (*reset*), esto es, *reescribir* la disposición original de marcas magnéticas que contenían sus registros de memoria de lectura (memoria ROM) con anterioridad a su apagado.

La teoría matemática de la complejidad algorítmica desarrollada en la década de los 60 aplicó los argumentos estadísticos de la teoría de la información de Shannon como estándar de medición del contenido informacional de las propias herramientas de cálculo y análisis matemático. Este programa de investigaciones ha permitido examinar de forma empírica las importantes implicaciones prácticas que, para la propia práctica de la investigación matemática, se derivan de un famoso meta-teorema matemático demostrado por el lógico-matemático austriaco Kurt Gödel en 1931.

Gödel trataba de mostrar la imposibilidad de auto-fundamentación lógica de sistemas de prueba matemática de cierta complejidad, como el conjunto de teoremas de la aritmética de Frege. El teorema matemático que lleva su nombre afirma que toda fórmula de cálculo lógico que toma como objetos teoremas matemáticos es, o bien inconsistente, en el sentido de que hace posible demostrar a la vez una cosa y su contraria, o bien incompleto, por cuanto ciertos teoremas verdaderos no son demostrables dentro de los parámetros axiomáticos del sistema lógico en cuestión. El Teorema de Gödel fue reinterpretado por un trabajo de 1936 del matemático británico Alan Turing que extendía el argumento paradójico de la lógica axiomática al examen teórico de los límites inherentes a la potencia computacional de un prodigioso autómatas teórico, un método algorítmico universal o “máquina de Turing”, que puede entenderse como un programa de ordenador diseñado para imitar a la perfección las operaciones de cualquier otro programa informático real o virtual.<sup>20</sup>

La importancia del llamado *teorema de detención de Turing* -que sostiene que no existe ningún procedimiento mecánico capaz de determinar para un programa informático de longitud

---

<sup>19</sup> “Olvidar resultados o desechar información resulta costoso desde el punto de vista de la termodinámica... el periódico de ayer ocupa un espacio [de memoria] importante, y el costo de liberarlo neutraliza el beneficio obtenido del periódico cuando todavía contenía noticias frescas.” (Bennett, 1988: 68).

<sup>20</sup> El trabajo clásico publicado por Turing en 1936, “On Computable Numbers and the *Entscheidungsproblem*” (Sobre números computables y el problema de la decidibilidad), introdujo por primera las imágenes pedestres de una cinta de papel continuo y un puntero de escritura en el etéreo centro de las disquisiciones en materia de lógica simbólica y codificación matemática (Hodges, 1992: 545).

arbitraria si, una vez puesto en marcha, se ejecutará o no en un tiempo finito- se revela, en primer lugar, en el propio estudio de los objetos matemáticos en apariencia más simples. Sea, por ejemplo, una persona (o un ordenador) que quiere realizar un análisis estadístico del grado cuantitativo de “irregularidad” que muestran ciertos objetos matemáticos propios de la teoría de los números, como la serie de decimales de  $\pi$  o ciertas soluciones polinómicas con componente complejo. El problema de partida que se le plantea aquí al analista es cómo determinar de manera fiable si el material de estudio del que dispone es o no adecuado para la tarea que pretende realizar, pues no le es posible generar, ni de forma manual ni de forma mecánica, una muestra *estadísticamente representativa* de la serie (infinita) cuya estructura quiere analizar.

Para que un registro estadístico parcial de datos pueda ser procesado inductivamente según los dictados de la teoría matemática de probabilidades es necesario que la serie empírica sea de algún modo normalizable, que se puedan “comprimir” o “reducir” matemáticamente sus apariencias fenomenológicas desordenadas. Existen sin embargo series numéricas, como la de los dígitos decimales de  $\pi$  o la de las soluciones de ecuaciones con números complejos, que son *algorítmicamente irreducibles* o bien *matemáticamente aleatorias*, en el sentido de que no existe ninguna fórmula matemática más simple -más corta- que la propia serie en cuestión que sea capaz de generarla. La razón de esto es que todo programa o sistema de reglas deductivas diseñado para comprimir la serie o bien es más extenso en bits de información que la serie misma o bien se halla incluido él mismo dentro de la serie. De hecho una serie numérica verdaderamente aleatoria o irreducible debe contener un conjunto infinito de elementos que sean ellos mismos subseries o subprogramas pseudo-aleatorios que dicen poder imitarla (comprimirla). Es en este sentido que la teoría matemática de la complejidad algorítmica afirma que una cadena de símbolos -eg. una secuencia de caracteres expresada en código binario de 0s y 1s- es aleatoria (o bien que posee una complejidad irreducible) cuando no puede ser comprimida algorítmicamente (Chaitin, 1990).

En términos prácticos, cuando se afirma que *no existe ningún método algorítmico capaz de comprimirla* quiere decir que no se conoce ningún procedimiento mecánico, verbigracia, un programa informático ejecutable por una maquinaria física finita sin ninguna ayuda exterior, cuya descripción completa consista en una cadena de caracteres de una longitud física menor que la secuencia que se desea generar, o que requiera un tiempo de ejecución menor, o un gasto energético menor, o un coste económico de computación menor. La teoría algorítmica de la información define de este modo un curioso concepto formal de ‘aleatoriedad’ que reconoce la posibilidad de superposición paradójica de orden y desorden

en el seno de un mismo fenómeno.

El origen de las teorías actuales sobre los límites lógicos y físicos de las operaciones de cómputo, puede retrotraerse en el tiempo al menos hasta la teoría matemática de la comunicación desarrollada en la década de los cuarenta por Claude Shannon, un ingeniero electrónico de AT&T. El enigma filosófico ancestral de qué puede entenderse por ‘información’ en un sentido abstracto y general, fue planteado por Shannon de forma harto original, asociado a un problema práctico de ingeniería electrónica: la búsqueda de un método de codificación óptima y transmisión eficiente de información en un entorno de canales de comunicación electrónica con capacidad limitada. En términos analítico-matemáticos más generales se trataba de un problema de computación teórica del nivel máximo de entropía mecánico-estadística que podría alcanzar un código de reglas sintácticas que permitiera construir cadenas de caracteres de longitud variable combinando entre sí un número finito de elementos o símbolos discretos. Según el modelo de Shannon medir la cantidad de información -entendida como incertidumbre desvelada o, a la inversa, *desorden* producido- por la llegada de un mensaje, equivalía a calcular *la probabilidad de ocurrencia* de una cadena de símbolos de longitud arbitraria (eg. la palabra “HAMLET”) dentro de un código gramatical entendido como sistema termodinámico en equilibrio.

El problema de calcular la probabilidad que tiene determinada molécula individual de un gas de encontrarse en la región más fría (caliente) del recipiente que lo contiene posee intuitivamente la misma estructura lógica que el problema de calcular la probabilidad que tiene una letra determinada de formar parte de una palabra muy larga (corta). Y ambas cuestiones tienen, en esencia, el sospechoso aspecto *económico* de un problema de asignación óptima de recursos escasos susceptibles de usos alternativos (Mirowski, 1996: 120). La teoría de la información de Shannon se construye, en efecto, como una auténtica *economía* de los códigos de comunicación. No por casualidad, entonces, al tomar contacto con la teoría estadística de la información de Shannon algunos economistas neoclásicos, notablemente Friedrich Hayek, modificaron su concepto tradicional del orden político ‘natural’ en un sistema económico de mercado para asimilarlo al nuevo imperialismo mecanicista de la ingeniería de sistemas de comunicación electrónica. El tufillo económico de las nuevas metáforas matemáticas de información y complejidad de Shannon, Wiener y otros, inspiró en los economistas neoclásicos una reinterpretación sutil del argumento clásico de Smith según el cual la eficiencia de los procesos de mercado debe evaluarse en relación con la asignación final de recursos escasos que por su medio se logra. Para el nuevo estilo de microeconomía matemática que comienza a



germinar durante las décadas de los 60 y los 70 la eficiencia putativa de las funciones mercantiles se localiza en realidad al nivel de los procedimientos intermedios de agregación pública y procesamiento distribuido de la información privada.<sup>21</sup>

#### Aleatoriedad financiera: Mandelbrot y la hipótesis del ‘azar salvaje’

Un interesante argumento epistemológico desarrollado por el estadístico, economista y filósofo de la ciencia estadounidense de origen rumano Nicholas Georgescu-Roegen es particularmente pertinente a la hora de clarificar la problemática lógico-matemática clásica de la naturaleza (subjativa o bayesiana, objetiva o frecuentista) de los conceptos físico-matemáticos de *probabilidad* y *aleatoriedad*. Georgescu distingue entre conceptos científicos de carácter *aritmomórfico* que sólo admiten a trámite aspectos de la realidad claramente distintos y separados entre sí; y conceptos de carácter *dialéctico* en cuyo seno puedan solaparse y superponerse aspectos de la realidad contradictorios entre sí. Según este autor los conceptos de probabilidad y aleatoriedad son de carácter dialéctico, pues admiten sin contradicción alguna la posibilidad de que un fenómeno sea al mismo tiempo desordenado y predecible, o bien ordenado e impredecible.

“La definición aportada por Laplace, la definición frecuentista, el coeficiente subjativo de apuestas y todas las demás definiciones matemáticas que se han propuesto, constituyen símiles aritmomórficos de una noción, la de probabilidad, que es esencialmente un concepto *dialéctico* en el más auténtico sentido hegeliano: comienza y acaba en sí mismo. Debido a este carácter dialéctico de la probabilidad todos los símiles mencionados han acabado en contradicciones. La probabilidad asociada a la observación de los fenómenos naturales es dialéctica porque su espina dorsal, el azar, es una noción dialéctica, *ya que el azar supone irregularidad, pero a diferencia de la casualidad intermitente, esa irregularidad es regular.*” (Georgescu-Roegen, 1994: 161-162, cursivas del autor).

El moderno concepto de complejidad algorítmica (Chaitin, 1990) es otro ejemplo de concepto dialéctico o paradójico: un concepto en sí mismo *no computable*. Como ha

---

<sup>21</sup> A partir de un famoso trabajo publicado en 1945 en la *American Economic Review* bajo el título “El uso del conocimiento en la sociedad” (Hayek, 1945), el controvertido economista austriaco comenzó a emplear, implícitamente primero y explícitamente después, el argumento de la información-entropía de Shannon y Weaver para defender la eficiencia de un mecanismo descentralizada de transmisión de señales que agrega y disemina, en forma de precios de mercado, toda la información relevante para la toma racional de decisiones económicas por los individuos. Como lo han observado posteriormente los nuevos microeconomistas neoclásicos de la información y los incentivos, continuadores del análisis neo-cibernético de la mano invisible inaugurado por Hayek, los precios de mercado pueden ser vistos como los parámetros probabilísticos que indican el valor de la temperatura económica global del mundo, ‘estadísticos suficientes’ cuya observación basta a los agentes para obtener una estimación ajustada del valor racional de cualquier bien o servicio económico (Grossman, 1987).

sostenido el matemático Roger Penrose en su polémico e influyente libro *La nueva mente del emperador*, la *comprensión* que es capaz de alcanzar un ser humano del Teorema de Gödel - “ver” que todo sistema formal de proposiciones lógicas debe necesariamente albergar proposiciones indecidibles o bien ser incompleto- ofrece una prueba irrefutable de la existencia de límites físicos a lo que puede ser computado por una máquina de Turing (Penrose, 1991: caps. 1 y 2). Y por tanto invalida las pretensiones de los defensores de la hipótesis fuerte de la Inteligencia Artificial (vgr. que se pueden construir máquinas capaces de pensar): pues esa facultad permite *ver* aquello para una máquina es siempre invisible, a saber, sus propios límites en tanto que entidad física. Para mostrar esto Penrose nos llama la atención sobre *lo que pasa* cuando una persona “ve” o “coge” la verdad del argumento de Gödel: ese “ver” es un evento físico, se trataría por tanto de un fenómeno físico *manifiestamente no computable*.<sup>22</sup>

El imponente, pero siempre frágil, edificio de la ciencia contemporánea se sostiene en buena parte sobre este precario trabajo, permanente reinventado y desbaratado, de domesticación tecnológica de fenómenos dialécticos que mezclan de forma inextricable orden y desorden (Hacking, 1993). Los problemas titánicos que afrontan las tareas de modelización, medición y empaquetamiento financiero del riesgo llevadas a cabo por economistas e ingenieros financieros son testigo de excepción de los estragos causados por este demonio interior de la ciencia moderna.

“Las fluctuaciones benignas han sido descritas por los matemáticos; muchas han sido explicadas por los científicos; los ingenieros han aprendido a manejarlas para volverlas más tolerables... Mas todo el mundo conoce ciertos dominios del saber, aceptados y definidos desde hace tiempo, que se resisten a la cuantificación... [E]l más patente afecta a las fluctuaciones económicas y, muy en concreto, a las financieras. Estas últimas tienen como modelo la exactitud de la física estadística, pero lo menos que puede decirse es que tal modelo sigue siendo un ideal muy lejano... [Para] las fluctuaciones financieras ¿donde se encontrará el equilibrio económico que haga las veces del equilibrio termodinámico “normal”?... Fue en el contexto de [mis investigaciones sobre] la Bolsa donde tomé conciencia por vez primera de un fenómeno inquietante y magnífico: el azar puro [salvaje] puede tener un aspecto que no podemos negarnos a calificar de creativo.” (Mandelbrot, 1996: 19-20).

En el corazón de la inmensa mayoría de las controversias teóricas y los contenciosos mercantiles y administrativos que tienen lugar actualmente alrededor de las fallas o las

---

<sup>22</sup> “La clave para Penrose reside en las reglas todavía misteriosas que gobiernan lo que sucede cuando un sistema físico es “observado” -la mismísima cosa que intrigaba a Turing en 1954. Turing llevó a cabo realmente un descubrimiento en el campo de la física en 1936, puesto que elucidó la existencia de fenómenos físicos no computables, a saber, las acciones de los cerebros humanos... Para Penrose el enigma real de Alan Turing es cómo fue posible que llegase a sostener un punto de vista tan contrario a todo lo que él y toda la gente que trataba conocían: que el cerebro podía hacer algo que una máquina no podía.” (Hodges, 1992: xvii).

ventajas comparativas de diferentes diseños de instrumentos de gestión de riesgos de inversión, reside este equívoco fundamental construido en torno al concepto-fetichismo de la ingeniería matemática de productos financieros: la *volatilidad*. Intentaré mostrar a continuación cómo el origen de estas disputas se explica, justamente, por el afán de tratar de domesticar un concepto *dialéctico, paradójico y no-computable* como el de *aleatoriedad* en el interior del marco aritmomórfico de los modelos matemáticos, métodos econométricos y tecnologías de computación al uso entre los ingenieros financieros.

En primer lugar, el análisis empírico de una gran mayoría de las series históricas de precios financieros y cotizaciones bursátiles arroja muchas veces como resultado parámetros estadísticos inestables o no convergentes; en concreto, los segundos momentos muestrales pueden ser arbitrariamente grandes, esto es, puede existir *varianza ilimitada* e incluso *varianza infinita*. En presencia de este tipo de síndrome estadístico no existe forma alguna de distinguir qué es una tendencia determinada y qué una fluctuación casual, cuál es el acierto y cuál el error, quién es el engañabobos que se forrará y quién el ‘primo’ que se arruinará (Mandelbrot, 1963a y 1971; Taleb, 1997a, b y c). El mecanismo de ordenamiento y desordenamiento que gobierna el proceso social de la especulación bursátil no opera de modo uniforme a lo largo del tiempo *sino que se comporta también de modo desordenado tanto a corto como a largo plazo*, a saltos y rachas que se suceden y solapan sin solución de continuidad. Aunque, como sabemos muy bien, a pesar de la *absoluta arbitrariedad* que rige este tipo de procesos y sus resultados, el ojo humano no puede por menos que observar en ellos, a cada instante y con todo lujo de detalles, apariencias deterministas de todo tipo, lineal, cíclico, tendencial, etc. (Mandelbrot, 1963b: 433-34).

El tipo estándar de análisis matemático de las decisiones de inversión financiera en contextos dinámicos que se impone desde fines de la década de los 70, se ha construido, en gran medida, *contra* el cuerpo de hipótesis -discontinuidad, varianza infinita y dependencia temporal a largo plazo- que define la teoría del azar salvaje de los movimientos de precios especulativos de Mandelbrot (Izquierdo, 1998: 69-75). A pesar de lo cual el biógrafo oficial de la ingeniería financiera neoclásica no ha podido por menos que reconocer la vigencia y la importancia crecientes de los problemas teóricos planteados por la obra econométrica de Mandelbrot:

“Las investigaciones de Mandelbrot concluían que la operativa de los valores financieros aparejaba realmente riesgos más altos de lo que se creía, que la diversificación podía no funcionar tan bien como lo había indicado Markowitz, que medidas [estadísticas del riesgo] como la varianza podían ser altamente inestables, y que los grandes movimientos de precios podían arracimarse [*cluster*] más densamente de lo esperado por los analistas. [...] Los sucesos de octubre de 1987 y otros episodios menos

dramáticos pero cualitativamente similares, prestan cierta evidencia a las advertencias de Mandelbrot. Pero a pesar de tales hechos, Mandelbrot permanece en la periferia de la teoría financiera, tanto por *la inconveniencia* que para los analistas supone el aceptar sus argumentos, como por *el natural deseo humano* de esperar que las fluctuaciones permanezcan confinadas entre límites familiares.” (Bernstein, 1992: 131-32, cursivas mías).

En segundo lugar, una de las anomalías empíricas más documentadas del modelo del paseo aleatorio de los mercados eficientes de capital, la amplia estabilidad estadística que muestran ciertos componentes tendenciales no periódicos y de la memoria a largo plazo de las series temporales financieras, ha permanecido casi completamente ignorada durante buen tiempo por la literatura econométrica al uso sobre análisis de series temporales. Tan sólo muy recientemente el fantasma del azar salvaje en su forma más domesticada -como ‘ruido gaussiano fraccionario’- ha vuelto de nuevo a ser invocado en la literatura académica: bien para suplantarlos por esquemas deterministas de antipersistencia o ‘reversión a la media’ (todo lo que sube en exceso tiende a bajar en exceso y viceversa), bien para confinarlos a los estrechos márgenes variacionales de la metodología estadística de autorregresión con medias móviles, como ocurre, por ejemplo, con los modelos ARFIMA (*AutoRegressive Fractionally Integrated Moving Averages*) de autorregresión con integración fraccional de medias móviles (Mills, 1993: capítulo 3).

En tercer lugar, las discontinuidades abruptas que muestra el movimiento de los precios especulativos en situaciones de máxima presión (como los *crashes*), así como la inestabilidad temporal y la rápida tasa de crecimiento de las medidas de varianza de las series estadísticas de precios para diferentes intervalos muestrales, han sido también largamente postergadas y oscurecidas en la econometría financiera dominante. El fantasma de la varianza infinita se escamotea generalmente en la actualidad recurriendo a diferentes expedientes epicíclicos. Los más usados son una clase de modelos no lineales de error estocástico, los modelos ARCH y GARCH (*Generalized AutoRegressive Conditional Heteroskedasticity*), en los que las varianzas muestrales de los errores seriales varían ellas mismas de forma bien conocida y controlada según un barroco esquema de autorregresión (id., capítulo 4). Otro expediente muy usado, finalmente, consiste en suponer la continuidad temporal ininterrumpida de las negociaciones del mercado para superponer linealmente procesos de difusión continua y procesos de Poisson (errores aleatorios que ‘saltan’ a diferentes niveles), que actúan como sucedáneos de la estabilidad estadística generalizada a diferentes escalas o estabilidad de Lévy-Pareto postulada por

originalmente por Mandelbrot en el análisis de series de cotizaciones bursátiles.<sup>23</sup>

Si bien, pese a todo este ingente y loable trabajo de reconstrucción matemática, reparación estadística y encastillamiento informático de la eficacia predictiva y la racionalidad económica clásicas, los agentes de carne y hueso que negocian valores especulativos en el entorno ampliamente descentralizado y desintervenido de los mercados financieros actuales, han acabado haciendo suyas -en secreto las más de las veces, pero cada vez más frecuentemente en público (vid. el capítulo 8)- las palabras premonitorias del sabio:

“Cuando una señal física de duración y energía ínfimas, “el vuelo de un bolígrafo”, provoca un cambio brutal de las anticipaciones, y cuando ninguna institución es capaz de inyectar la inercia suficiente para mantener bajo control asuntos tan complicados, un precio determinado sobre la base de anticipaciones especulativas puede desplomarse hasta cero, elevarse hasta perderse de vista, hacer cualquier cosa.” (Mandelbrot, 1997a [1963]: 468).

Aprovechando la maravillosa oportunidad que ofrecían las nuevas tecnologías de cómputo electrónico para abandonar el formalismo analítico por la simulación numérica, la teoría económica de las finanzas, tal vez la variedad más elaborada de esa teoría funcionalista de la realidad social que es la microeconomía neoclásica, y su vehículo práctico, la ingeniería financiera, el *ars nova* de la economía global, han jugado un papel determinante en el desencadenamiento y la integración de gran parte de los sucesos de innovación y reestructuración industrial acontecidos en los mercados de capital durante las últimas tres décadas. Sin embargo la probada imposibilidad de asimilar la fenomenología “salvajemente aleatoria” de los mercados de valores (Mandelbrot, 1997d) en el interior de los modelos de explicación mecánica que provee la teoría neoclásica de las finanzas, parece tener en último término su origen en la conocida ‘paradoja informacional’ que subtiende la comprensión analítica de las actividades organizadas de valoración especulativa.

En mundos sociales como las bolsas especulativas donde se negocian valores de inversión, la *propiedad privada de la información* y la *preferencia subjetiva por el riesgo* son las únicas variables estratégicas que los sujetos pueden utilizar para diferenciarse de, y por tanto competir con, los demás. De modo que es imposible pretender que se cumpla lo que de hecho es el axioma de base de la teoría de los mercados eficientes, a saber: que cada individuo aislado posea un conocimiento perfecto tanto de los parámetros de riesgo de su

---

<sup>23</sup> “[E]n modelos de *negociación continua*, la dinámica de los precios de los valores financieros puede siempre describirse mediante una ‘mezcla’ de procesos de difusión de trayectoria muestral continua y procesos gobernados por una variable aleatoria de Poisson sin pérdida de generalidad alguna.” (Merton, 1983: 49).

propia acción como del nivel agregado de riesgo imperante en el campo donde su acción se desarrolla. Como reza una conocida crítica interna de la utopía neoclásica de los mercados competitivos procesadores eficientes de información:

“Allí donde existen diferencias entre creencias subjetivas que no han sido totalmente arbitradas [v.g. eliminadas], existe un incentivo para crear un mercado... Pero, puesto que las diferencias entre creencias son ellas mismas un producto endógeno al mercado, esto es, surgen del gasto necesario para adquirir información y de la información vehiculada por el sistema de precios, la creación de mercados elimina las diferencias entre creencias que son el origen de los mercados, haciendo por tanto que los mercados desaparezcan... De modo que es posible afirmar que tan pronto modificamos los supuestos convencionales del modelo de mercados perfectos de capital para permitir la existencia de incluso la más mínima cantidad de información imperfecta y aun el más mínimo coste de obtención de información la teoría tradicional se vuelve insostenible... [Justamente] debido a que la información es costosa de obtener, los precios no pueden reflejar perfectamente la información que disponible, puesto que, si lo hicieran, aquellos que han gastado recursos en obtenerla no recibirían compensación alguna.” (Grossman y Stiglitz, 1980: 404).

El dilema de la pertenencia simultánea de la información factual a dos regímenes contrapuestos de regulación social de la actividad económica, por un lado a la esfera del intercambio privado donde se impone una estructura de incentivos económicos (como la definición de derechos de propiedad excluyentes) con el propósito de aumentar los niveles de *producción*, y por el otro la esfera de la redistribución pública, donde se imponen incentivos de signo contrario (restricciones y excepciones a la apropiación exclusiva) para tratar de aumentar el nivel de *difusión*, no es privativo de la dinámica económica de los mercados financieros. Al contrario: es el rasgo característico de todos los mercados donde se comercian bienes o servicios ricos en información, desde el mercado editorial al mercado farmacéutico, pasando por el mercado del *software informático*, el cinematográfico, el crediticio, el asegurador y, en general todos los mercados de servicios de asesoría técnica y consultoría experta (fiscal, legal, psicológica, educativa, médica, empresarial, etc.)<sup>24</sup>

Lo que distingue a los mercados financieros de los demás mercados de información es el hecho de que la ambivalencia funcional de la información, a la vez objeto en juego y regla del juego, se siente aquí con mayor intensidad como consecuencia, en buena medida, del papel competitivo determinante que en ellos desempeñan un conjunto de tecnologías específicas de

---

<sup>24</sup> “En casi todos los... mercados donde la información es importante, el uso de información privilegiada está bien establecido y es ampliamente aceptado. Por ejemplo, los derechos de explotación minera son adquiridos rutinariamente por aquéllos más capaces que los vendedores de evaluar el potencial de un lugar... Los compradores de ganado confían en las estimaciones superiores de lo que pagarán los mayoristas cuando negocian con los rancheros. Y lo mismo ocurre en los mercados artísticos, inmobiliarios, deportivos profesionales, de hecho prácticamente en todos los mercados con variaciones sustanciales en los precios. En todos estos mercados, unos cuantos compradores se aprovechan rutinariamente de conocimientos que muchos

tratamiento de la incertidumbre informacional, en especial las técnicas de gestión de riesgos que se apoyan sobre modelos econométricos de la volatilidad de los precios.

## Conclusión

Según un cierto estándar de modelización econométrica de amplia aceptación en la comunidad académica y profesional de los economistas financieros (Lamothe, 1993: 114-120; Jorion, 1997a: 165ss.), la medida de la volatilidad estadística del precio de un activo financiero se calcula como suma de dos componentes analíticos perfectamente diferenciados: uno objetivo, la *volatilidad histórica* que se calcula a partir de series temporales de cotizaciones pasadas; y otro subjetivo, la *volatilidad esperada*, calculada al modo bayesiano mediante la ponderación de diferentes tipos de evidencia disponible no contenida en las series temporales de precios. Y en particular teniendo en cuenta la información que proporciona el precio o prima que se paga actualmente en el mercado por un contrato de opción sobre ese activo, que es lo que se conoce como *volatilidad implícita*. El problema con este marco normativo estándar para la formulación de juicios públicos sobre el riesgo financiero es que, a no ser que se admita la hipótesis tan lógicamente inverosímil como históricamente desacreditada de que “el mercado nunca se equivoca” (o, más precisamente, que la volatilidad implícita en las cotizaciones bursátiles es una medida correcta de los riesgos reales de inversión existentes en cada momento), es científicamente imposible determinar cuál es, cuál era y cuál será la *auténtica* volatilidad histórica o esperada de un valor.

De lo cual se sigue un corolario práctico aun más peliagudo si cabe: dado que carecemos de un método objetivo universalmente validado para calcular el valor correcto de la volatilidad de precios financieros, no podemos, por definición, arbitrar procedimientos de prueba realmente fiables para discernir un error de cálculo de un fraude mercantil en este dominio de acción. Efectivamente, si una medida teórica de la volatilidad del precio de las acciones de una empresa muestra una discrepancia considerable bien respecto de su valor histórico promedio, bien respecto del valor de volatilidad implícito en la cotización de mercado actual de un contrato de opción sobre esas acciones, bien respecto de cualesquiera combinaciones matemáticas de ambos valores, ¿cómo podemos saber cual ha sido el origen de

---

vendedores no poseen.” (Haddock, 1998: 594).

ese desajuste numérico? ¿Fue producido por un error cognitivo no intencionado, esto es, *aleatorio*, y por tanto totalmente disculpable o se trata de una falta negligente fruto de una falta de atención, de un descuido evitable? ¿Nos hallamos ante un caso de incompetencia profesional o debe hablarse por contra de imprudencia temeraria en la aplicación de conocimientos de validez dudosa? ¿Pudo deberse la desviación de la cifra de volatilidad a una manipulación fraudulenta de las herramientas matemáticas empleadas en su cálculo o es atribuible más bien a la falsificación los datos estadísticos introducidos en el modelo? Y si, tras un impecable trabajo detectivesco de rastreo de pistas y reconstrucción de movimientos llegamos a formular alguna hipótesis de trabajo sobre las posibles causas del desvío *¿con qué grado de seguridad podríamos sostenerla?* Y si, al cabo de nuestra investigación policial, llegásemos finalmente a inducir alguna conclusión al respecto *¿con qué grado de certeza podríamos probarla?*

Sabemos, sin embargo, que cuando los criterios exclusivamente técnicos de exactitud y eficiencia no se bastan por sí solos para cerrar una controversia científica sobre lo acertado o lo errado de un cálculo de volatilidad o para decidir un litigio sobre lo aceptable o lo rechazable, desde un punto de vista legal, de determinada operación mercantil de toma de riesgos, los actores implicados en el caso intentan salir del atolladero recurriendo a un conjunto suplementario de criterios de juicio que atacan el problema de la decidibilidad de la acción desde el punto de vista complementario (que no alternativo) de su *moralidad*. Pero para ello, como veremos en los capítulos siguientes, han de realizar un trabajo, ciertamente costoso, de traducción de los razonamientos en términos de fiabilidad de los cálculos al lenguaje argumental de la *justicia de los comportamientos*.