



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL



CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN
COMPUTACIÓN

Modelación microscópica de la dinámica de un
mercado de valores usando autómatas
celulares

TESIS

Que para obtener el grado de maestro en ciencias de la
computación

Presenta

Miguel Suárez Oropeza

Director de tesis

M. en C. Germán Téllez Castillo

México D.F.

Diciembre de 2012



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D.F. siendo las 13:00 horas del día 14 del mes de Junio de 2012 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del:

Centro de Investigación en Computación

para examinar la tesis titulada:

"Modelación microscópica de la dinámica de un mercado de valores usando autómatas celulares"

Presentada por el alumno:

SUÁREZ

Apellido paterno

OROPEZA

Apellido materno

MIGUEL

Nombre(s)

Con registro:

B	1	0	1	6	6	6
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de: **MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Director de Tesis

M. en C. Germán Téllez Castillo

Dr. Luis Pastor Sánchez Fernández

M. en C. Sergio Sandoval Reyes

Dra. Nareli Cruz Cortés

Dr. Rolando Menchaca Méndez



PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN

Dr. Luis Alfonso Villa Vargas

DIRECCIÓN



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México DF el día 31 del mes Octubre del año 2012, el (la) que suscribe Miguel Suárez Oropeza alumno (a) del Programa de Maestría en Ciencias de la Computación con número de registro B101666, adscrito al Centro de Investigación en Computación, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del M. en C. Germán Téllez Castillo y cede los derechos del trabajo intitulado Modelación microscópica de la dinámica de un mercado de valores usando autómatas celulares, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección miguelsuarezoropeza@gmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.


Miguel Suárez Oropeza

Nombre y firma

Resumen

El mercado de valores es un sistema dinámico complejo. En la búsqueda por la comprensión de su dinámica se han realizado distintas aproximaciones. La mayoría de los modelos clásicos en finanzas son principalmente analíticos, lo que complica la tratabilidad. Ante esto, otros enfoques han sido empleados y uno de los que ha tenido gran auge en el campo de la modelación del mercado financiero es el de la Simulación Microscópica, y en particular los modelos basados en autómatas celulares.

En el presente trabajo de tesis se presenta el diseño e implementación de un modelo de mercado de valores basado en autómatas celulares para el análisis del comportamiento de los inversionistas. El modelo propuesto reproduce las principales características observadas empíricamente en variaciones de precio, rendimiento, comportamiento de agentes de inversión en los mercados financieros y sobre todo los “hechos estilizados” que caracterizan la dinámica compleja de los mercados y que son comunes entre muchos instrumentos financieros, mercados y horizontes de tiempo.

Se presentan, al final, las correspondencias de las características encontradas en el modelo como generadoras de los hechos estilizados en la series de tiempo de rendimiento y precio con la finalidad de contribuir en el entendimiento de la dinámica de este tipo de sistemas.

Abstract

Stock market is a dynamic complex system. In the search for comprehension of its dynamics, several approaches have been made. Most classical models in finance are mainly analytical, which difficult tractability. Against this, some other approaches have been taken and one of them with growing interest in the financial market modeling field is Microscopic Simulation, particularly cellular automata based models.

In the current document of thesis, design and implementation of a cellular automata stock market model is introduced, for the analysis of investors' behavior. The model aims to reproduce the main characteristics empirically observed in price variations, return, trading agents behavior and, above all, “stylized facts” characterizing the complex dynamics of markets which are common across many financial instruments, markets and time horizons.

In the end, correspondence with the characteristics found in the model are presented as generators of the stylized facts in price and return time series aiming to contribute for the understanding of this kind of systems dynamics.

Dedicatoria

A mis padres, mi mayor ejemplo.

Agradecimientos

Se agradece al Centro de Investigación (CIC) y al Instituto Politécnico Nacional (IPN) por su imprescindible apoyo en la realización de este trabajo. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico proporcionado durante parte de mi programa de maestría.

Quiero agradecer muy profundamente al M. en C. Germán Téllez Castillo por el gran esfuerzo, inspiración y apoyo que brindó siempre en mi formación y para llevar este trabajo a término.

A los compañeros que formaron parte de esta etapa de mi vida ofreciendo siempre su apoyo sincero y desinteresado, haciendo agradable mi estancia en el CIC.

A los profesores involucrados en mi formación académica durante el programa de maestría.

A mi familia y amigos, por quienes soy quien soy.

Índice general

Resumen.....	iii
Abstract	iv
Dedicatoria	v
Índice de Figuras	x
Índice de Tablas.....	xiii
Glosario.....	xiv
Capítulo 1. Introducción	- 1 -
1.1. Objetivo General.....	- 2 -
1.2. Objetivos específicos.....	- 2 -
1.3. Justificación.....	- 2 -
1.4. Organización del documento.....	- 3 -
Capítulo 2. Marco conceptual.....	- 4 -
2.1. Simulación microscópica.....	- 4 -
2.1.1. Requisitos y componentes de los modelos de simulación micro.....	- 6 -
2.2. Autómatas Celulares.....	- 7 -
2.2.1. Historia.....	- 7 -
2.2.2. Componentes de un AC.....	- 10 -
2.2.2.1. Lattice	- 10 -
2.2.2.2. Condiciones de frontera	- 11 -
2.2.2.3. Vecindad	- 12 -
2.2.2.4. Estados.....	- 12 -
2.2.2.5. Función de transición de estado.....	- 13 -
2.3. Mercado de valores.....	- 15 -
2.3.1. Definición del mercado de valores.....	- 16 -
2.3.2. Mercado de deuda.....	- 17 -
2.3.3. Mercado cambiario	- 17 -

2.3.4.	Mercado accionario.....	- 18 -
2.3.5.	Acciones	- 18 -
2.3.6.	Índices bursátiles	- 19 -
2.3.7.	Participantes y mecanismos del mercado.....	- 19 -
Capítulo 3.	Estado del arte.....	- 22 -
3.1.	¿Cómo se ha atacado la modelación del mercado de valores?	- 22 -
3.1.1.	Modelos no basados en AC	- 25 -
3.1.1.1.	Modelo de Cont-Bouchaud.....	- 25 -
3.1.1.2.	Modelo de Bak	- 26 -
3.1.2.	Modelos basados en AC.....	- 27 -
3.1.2.1.	Modelo de Wei	- 27 -
3.1.2.2.	Modelo de Bartolozzi	- 28 -
3.1.2.3.	Modelo de Bandini	- 30 -
3.1.2.4.	Modelo de Qiu.....	- 32 -
Capítulo 4.	Modelo propuesto	- 35 -
4.1.	Lattice	- 35 -
4.2.	Vecindad	- 36 -
4.3.	Estados.....	- 36 -
4.4.	Función de transición.....	- 37 -
4.4.1.	Decisión de transición	- 38 -
4.4.1.1.	Fundamentalistas:	- 38 -
4.4.1.2.	Imitadores:.....	- 39 -
4.5.	Influencias externas.....	- 40 -
4.6.	Preferencia de inversión.....	- 40 -
4.7.	Actualización de precio.....	- 42 -
4.8.	Medidas de estabilidad del modelo de mercado	- 42 -
4.8.1.	Curtosis	- 43 -
4.8.2.	Exponente de Hurst	- 44 -

Capítulo 5. Simulación y resultados.....	- 46 -
5.1. Visión general de la implementación.....	- 46 -
5.2. Influencia de los parámetros	- 48 -
5.2.1. Sensibilidad de ajuste de precio.....	- 48 -
5.2.2. Probabilidad de Imitación.....	- 50 -
5.2.3. Precio inicial y fundamental	- 53 -
5.2.4. Factor Macro.....	- 55 -
5.2.5. Configuración inicial.....	- 57 -
5.3. Curtosis y Exponente de Hurst	- 61 -
Capítulo 6. Conclusiones y Trabajo Futuro.....	- 64 -
6.1. Conclusiones.....	- 64 -
6.2. Investigación Futura	- 65 -
Capítulo 7. Referencias.....	- 66 -
Apéndice A. Detalle de implementación del modelo.....	- 69 -
Apéndice B. Manual de usuario.....	- 73 -

Índice de Figuras

Figura 2.1 Simulación microscópica de tránsito vehicular	6 -
Figura 2.2 Ejemplo de configuración encontrada en Life. Evolución de un glider.	8 -
Figura 2.3 Ejemplos de configuración encontradas en el Life. Pistola de gliders.	8 -
Figura 2.4 Distintas configuraciones de celdas para un grid bidimensional: (a) cuadrada, (b) triangular, (c) hexagonal, (d) irregular	11 -
Figura 2.5 Visualización de frontera cerrada para una (a) y dos (b) dimensiones.....	11 -
Figura 2.6. Vecindad de von Neumann (a); y Moore (b).....	12 -
Figura 2.7 Ejemplo de configuración global s en una lattice unidimensional.....	13 -
Figura 2.8 Bolsas de valores con la mayor capitalización de mercado al 2011, en miles de millones de dólares[14].	16 -
Figura 3.1. Ejemplo de una configuración del modelo Cont-Bouchaud con 5 subgrafos y los valores 0, +1 y -1 denotando su actividad: abstenerse, comprar o vender.....	26 -
Figura 3.2 Evolución de precio con radios de 1 y 2 en una vecindad de Moore, a y b, respectivamente.	32 -
Figura 3.3. Distribución de rendimiento diario de S&P 500 en el periodo de Junio de 1950 a Junio de 2005 (a) y resultados de simulación (b), comparadas con una PDF Gaussiana y una PDF Lorentziana.....	33 -
Figura 3.4. Trayectorias de precio obtenidas para distintos valores de cp (0.1, 0.9 y 1.02).....	34 -
Figura 5.1 Interfaz de usuario de la aplicación para el modelo.....	46 -
Figura 5.2 Gráficas mostradas en la ejecución de la aplicación del modelo. (a) Evolución de precio y (b) Distribución de rendimiento.....	47 -
Figura 5.3. Gráficas mostradas en la ejecución de la aplicación del modelo. (a) Evolución de rendimiento y (b) Exponente de Hurst	47 -
Figura 5.4. Evolución de precio con $cp = 0.5$. El precio alcanza su pico más alto al final de la ejecución.	49 -
Figura 5.5. Evolución de precio con $cp = 1.0$. El precio se mantiene alrededor de las 280 unidades pero sin alcanzar el precio fundamental.	49 -
Figura 5.6. Evolución de precio con $cp = 10$. El aumento en la sensibilidad provoca una rápida subida del precio y variaciones fuertes alrededor del precio fundamental.	50 -
Figura 5.7. Evolución de precio con $Pi = 0.1$. Las oscilaciones en el valor del precio son moderadas.....	51 -
Figura 5.8. Evolución de precio con $Pi = 0.5$. Las oscilaciones en el valor del precio aumentan por encima del precio fundamental.....	52 -

Figura 5.9. Evolución de precio con $P_i = 0.8$. Las oscilaciones se vuelven mucho más pronunciadas, aún cuando el valor de sensibilidad cp no cambió.....	52 -
Figura 5.10. Evolución de precio con $p(1) = 100$ y $F = 150$. El corto rango entre $p(1)$ y F permite variaciones notables en la evolución del precio.	54 -
Figura 5.11. Evolución de precio con $p(1) = 100$ y $F = 1000$. Un rango mayor entre estas dos variables permite disminuir la influencia de la imitación.....	54 -
Figura 5.12. Evolución de precio con $p(1) = 100$ y $F = 1000$, pero con $cp = 3.0$. El precio fundamental se alcanza más rápido y p se mantiene con poca variación.	55 -
Figura 5.13. Evolución de precio con $M_f = 0.01$. La influencia externa es mínima.	56 -
Figura 5.14. Evolución de precio con $M_f = 0.5$. El precio supera su valor fundamental (300) pero mantiene estabilidad alrededor de las 600 unidades.	56 -
Figura 5.15. Evolución de precio con $M_f = 0.8$. El precio sigue siendo mayor a su valor fundamental y oscila alrededor de las 800 unidades.	57 -
Figura 5.16. Evolución de precio con configuración inicial aleatoria y 50% de agentes fundamentalistas. El precio oscila alrededor de las 300 unidades al estabilizarse.	58 -
Figura 5.17. Evolución de precio con configuración inicial aleatoria y 80% de agentes fundamentalistas. Las fluctuaciones son mayores así como el valor de precio en que se mantiene el activo (~500).	59 -
Figura 5.18. Evolución de precio con configuración inicial de líneas paralelas y 80% de agentes fundamentalistas. Se mantienen las fuertes variaciones de precio para $t < 20$ y el precio en que se estabiliza el activo.	59 -
Figura 5.19. Diferentes configuraciones iniciales para la distribución de agentes fundamentalistas. (a) Uniforme, (b) Aleatoria, (c) Líneas paralelas, (d) Marco al centro, (e) Marco (f) Cuadro al centro (g) Continua Vertical, (h) Continua Horizontal, (i) Cruz.....	60 -
Figura 5.20. Distribución de rendimiento obtenida con $cp = 1$, $P_i = 0.1$ y 100 agentes fundamentalistas en configuración aleatoria. La curtosis obtenida es de 397.41	62 -
Figura 5.21. Coeficiente de Hurst de 1.055, para $cp = 1$, $P_i = 0.1$ y 100 agentes fundamentalistas en configuración aleatoria.....	62 -
Figura 5.22. Coeficiente de Hurst de 0.92, para $cp = 0.8$, $P_i = 0.1$ y 100 agentes fundamentalistas en configuración aleatoria. El valor de $H : .5$ sugiere cierto nivel de correlación.	63 -
A.1Diseño general de la aplicación.	72 -
Figura B.1 Icono de la aplicación CASMM.....	73 -
Figura B.2 Interfaz principal. Es lo primero que se muestra al usuario	73 -
Figura B.3 Botón Iniciar y Botón Detener desactivado.	74 -
Figura B.4 Botón Pausa y Detener (activado)	75 -

Figura B.5 Botón Reiniciar.....	- 75 -
Figura B.6 Controles de número de iteraciones y modo turbo (desactivado).....	- 76 -
Figura B.7 Controles para los parámetros del modelo.....	- 77 -
Figura B.8 Menú de configuración inicial.....	- 78 -
Figura B.9 Ventana de selección de configuración inicial y opciones de configuración.	- 78 -
Figura B.10 Opción de cantidad en la configuración continua vertical.	- 79 -
Figura B.11 Opciones de gráficas dentro del menú de Configuración.....	- 79 -
B.12 Opciones de gráficas en la aplicación: (a) evolución de rendimiento; (b) evolución de precio; (c) Distribución de rendimiento; y (d) Puntos de Hurst.....	- 80 -
Figura B.13 Mensaje de error al solicitar las gráficas de Distribución de Rendimiento y Hurst después de una ejecución con pocos pasos.....	- 80 -

Índice de Tablas

Tabla 4-1. Probabilidad de transición de estado	- 41 -
Tabla 4-2. Transición de estado con Factor Macro.....	- 41 -
Tabla 4-3 Algoritmo para obtener el exponente de Hurst de un conjunto de datos D	- 45 -
Tabla 5-1 Plataforma de implementación del modelo.	- 46 -
Tabla 5-2. Escenario de simulación con parámetro de sensibilidad variable.....	- 48 -
Tabla 5-3. Escenario de simulación con parámetro de probabilidad de imitación variable.....	- 51 -
Tabla 5-4. Escenario de simulación con Precio inicial y fundamental variables.....	- 53 -
Tabla 5-5. Escenario de simulación con factor macro M_f variable.....	- 55 -
Tabla 5-6. Escenario de simulación con configuración inicial variable.....	- 58 -
Tabla 5-7. Escenario de simulación para configuración inicial variable.....	- 61 -

Glosario

- **Agente**

Individuo o institución financiera autorizado por otra (un cliente), para actuar en designación del interesado en transacciones que involucran terceras personas. Son los bancos y casas de bolsa los que generalmente se eligen por los individuos para ser sus agentes, y así autorizan a sus empleados para que actúen por designación de un director.

- **Bolsa de valores**

Institución privada, constituida como Sociedad Anónima de Capital Variable, que tiene por objeto facilitar las transacciones con valores y procurar el desarrollo del mercado respectivo.

- **Bono**

Es un instrumento emitido por un prestatario que lo obliga a realizar pagos específicos al tenedor a lo largo de un periodo específico de tiempo.

- **Casa de bolsa**

Entidad financiera privada autorizada para actuar en el mercado de valores. Su finalidad principal es la de auxiliar a inversionistas en la compra y venta de diversos tipos de títulos mercantiles tales como bonos, valores, acciones, etc.

- **Ciclo económico**

Periodos alternativos de alzas y bajas en los niveles de actividad económica que guardan entre sí una relación de sucesión, crisis, depresión, recuperación y auge.

- **Demanda**

Cantidad de bienes y servicios que los agentes económicos desean y pueden comprar a un precio dado en un periodo determinado.

- **Director**

La parte principal o autorizadora en una transacción o relación de negocio.

En teoría la demanda y la oferta son los dos componentes básicos que fijan el precio de los bienes y servicios.

- **Formador de mercado**

Es un miembro autorizado para promover la liquidez, establecer precios de referencia y contribuir a la estabilidad de precios de un valor o de un conjunto de valores del Mercado de Capitales, a través del mantenimiento de forma permanente de y por cuenta propia de Posturas de compra y venta de los citados valores.

- **Hecho estilizado**

Es una presentación simplificada de un descubrimiento empírico. Un hecho estilizado es regularmente una generalización que resume algunos cálculos estadísticos, los cuales pueden ser esencialmente ciertos aunque con algunas imprecisiones a nivel de detalle.

- **Oferta**

Cantidad de bienes y servicios disponibles para la venta y que los oferentes están dispuestos a suministrar a los consumidores a un precio determinado.

- **Opción**

Una opción es un contrato que da a su poseedor el derecho, pero no la obligación, de comprar o vender un número fijo de acciones (u otro instrumento) a un precio fijo dentro o antes de un plazo dado.

- **Operar**

Acción de comprar o vender un cierto número de acciones (u otro instrumento).

- **Riesgo**

En finanzas, el concepto de riesgo está relacionado con la posibilidad de que ocurra un evento que se traduzca en pérdidas para los participantes en los mercados financieros, como pueden ser inversionistas, deudores o entidades financieras. El riesgo es producto de la incertidumbre que existe sobre el valor de los activos financieros, ante movimientos adversos de los factores que determinan su precio; a mayor incertidumbre mayor riesgo

- **Título**

Documentos que representan el derecho que tiene su poseedor sobre un capital o crédito. Estos documentos son objeto de comercio y su cesión o endoso transfiere la propiedad o derechos implícitos.

- **Valores**

Títulos representativos de participaciones o haberes de sociedades, de cantidades prestadas, de mercancías, de fondos de dinero o de servicios que son materia de operaciones mercantiles.

- **Volatilidad**

Variaciones significativas a menudo impredecibles, en un cierto período.

Capítulo 1. Introducción

Los mercados de valores tienen un rol en la promoción del desarrollo de la industria y el comercio de un país. Se trata de instituciones que permiten que una empresa pueda captar capital adicional para su expansión, que se desarrollen proyectos mediante su financiación, se intercambien acciones, haya mayor competencia entre las fuentes de financiamiento e incluso que el país tenga inversión en dinero extranjero [1].

Por otro lado, los bancos e instrumentos financieros tienden a desarrollarse ante el crecimiento económico, y los servicios que los mercados financieros proveen se vuelven más importantes conforme un país crece [2].

Por estas razones, es necesario estudiar y analizar la dinámica de los mercados para obtener una mayor comprensión del mismo y poder sugerir políticas de desarrollo ajustadas a las necesidades de cada caso particular.

Los estudios del mercado indican que existen hechos estilizados que caracterizan el comportamiento del mercado de valores. En este trabajo se diseña un modelo de Simulación Microscópica de Mercado de valores basado en Autómatas Celulares (AC) que reproduce dichos hechos estilizados, tomando en cuenta propiedades globales y locales.

La aplicación del enfoque de AC para el modelado y simulación de sistemas complejos está difundida en áreas de investigación multidisciplinarias, se aplica en el modelado de procesos en sistemas físicos, químicos, biológicos, ciencias de la computación, etc.[3]; y ha mostrado además ser especialmente apto en el área de modelado de mercado financiero como sistema complejo.

El problema que se analiza en esta tesis es el comportamiento del mercado de valores mediante el enfoque de un AC; este enfoque nos permite describir interacciones locales y globales que caracterizan a los agentes económicos involucrados en el mercado financiero.

1.1. Objetivo General

Diseñar, implementar y validar un modelo de autómatas celulares que reproduzca la dinámica compleja del comportamiento de inversiones en el mercado de valores a partir del comportamiento de los agentes inversionistas, tomando en cuenta la oferta y la demanda, ajustes de precio, diferentes tipos de inversionistas y factores externos.

1.2. Objetivos específicos

1. Diseñar un modelo de evolución basado en autómatas celulares que reproduzca las principales características observadas en variaciones de precio y comportamiento de agentes de inversión en los mercados financieros.
2. Implementar la aproximación en el objetivo particular 1.
3. Validar los resultados generados por la simulación de nuestro modelo contra los datos publicados, así como las interacciones observadas entre los agentes del mercado, i.e. interacciones locales.

1.3. Justificación

Los mercados financieros representan el motor mediante el cual se ven impulsadas las economías alrededor de todo el mundo. La capacidad de entenderlo se hace necesaria cuando se requieren aplicar leyes que regulen la estabilidad mediante, por ejemplo, formadores de mercado (un tipo de agentes de inversión del que se habla en el Capítulo 2).

El enfoque elegido de modelación usando Autómatas Celulares se presenta como ideal para el tipo de sistema de que se trata, i.e., un sistema complejo. Además, sobre la base de que los principales actores en la formación de la dinámica del mercado son los agentes que operan en él, se obtiene una relación directa entre estos y las celdas en un AC, sus interacciones como reglas de vecindad y toma de decisiones como regla de evolución.

El presente trabajo busca generar una mayor comprensión sobre la dinámica que rige el mercado financiero para así, en un futuro, lograr aproximarse a modelos ajustados a las necesidades del país, y así tener más herramientas en la toma de decisiones respecto a este rubro de la economía.

1.4. Organización del documento

A continuación daremos una breve descripción del contenido de los siguientes capítulos:

- El capítulo 2 presenta información de antecedentes, tratando los temas que sirven de base para el desarrollo de esta tesis.
- El capítulo 3 muestra trabajo previo realizado en la misma dirección que el presente y las novedades relacionadas con el área de modelado de mercado financiero.
- El capítulo 4 describe el modelo propuesto de manera extendida, junto con detalles de implementación.
- El capítulo 5 incluye los resultados que se obtienen del modelo.
- Finalmente, en el capítulo 6, se presentan las conclusiones del trabajo, propuestas de trabajo futuro y el compendio de referencias.

En este capítulo se han presentado la introducción, objetivos y justificación de este trabajo de tesis, así como la organización de este documento.

Capítulo 2. Marco conceptual

En este capítulo se describen los conceptos que sirven de base para el presente trabajo. En primer lugar se describe la simulación microscópica, siendo el enfoque base para este trabajo, como conjunto de técnicas de modelado del cual los Autómatas Celulares (AC) forman parte. Se proporciona luego una descripción de lo que son los autómatas celulares, su evolución histórica con el fin de mostrar la importancia que han ido adquiriendo desde su concepción, y las áreas de aplicación que tienen para dar paso después a una descripción más detallada junto con la de cada uno de sus componentes. Se describe después al mercado de valores como sistema complejo, la importancia de su estudio y los actores principales que intervienen en la generación de su dinámica.

2.1. Simulación microscópica

Los análisis apoyados por una simulación pueden ser útiles tanto en la creación de teorías como para examinar los efectos de la aplicación de diversas normas. Las simulaciones ayudan a crear nuevas teorías estimulando la formulación de hipótesis de comportamiento del modelo en cuestión. Los análisis de los impactos de distintas políticas se pueden llevar a cabo si en el modelo se han establecido de manera satisfactoria las hipótesis de comportamiento y las relaciones institucionales. El impacto del análisis sigue un cierto patrón y objetivo de investigación. Entonces, la simulación puede definirse como un experimento orientado a un objetivo donde un modelo imita al sistema de interés [4].

Una simulación puede basarse en información de nivel macroscópico, mesoscópico y microscópico. Los agregados de una economía a nivel nacional, como el consumo, ahorro, gastos de seguridad social, etc., forman la base de modelos macroeconómicos, con experimentos de macrosimulación subyacentes. El nivel meso toma algunos grupos sociales reunidos en ‘células’ como unidades de interés (e.g., población agrupada por diferentes edades y/u otras agrupaciones socioeconómicas).

En contraste con los modelos de simulación de tipo macro y meso, los modelos de Microsimulación (MSM, por sus siglas en inglés) involucran directamente a las unidades individuales: microunidades, i.e., personas, familias, unidades de impuestos, firmas, uniones, etc., en sus respectivas asociaciones. Estas microunidades se identifican por características como edad

del individuo, número de hijos, ingresos, impuestos, etc. Estas características se modifican después en el modelo de MS dependiendo de su comportamiento individual y las relaciones institucionales en las que operan. Los impactos individuales de medidas económicas y sociales en las microunidades involucradas se pueden analizar entonces directamente enfocándose en los efectos distribucionales.

Los modelos de simulación y en particular los MSM han sido aplicados de manera incremental en años recientes para análisis cuantitativos de problemas sociales y económicos. Los modelos de simulación microscópica analizan los efectos a nivel individual de nuevas políticas económicas y sociales cuando estas se planean o investigan. Por tanto, ya que la microsimulación involucra el comportamiento de microunidades, es especialmente adecuada para analizar los impactos de las medidas sobre aquellos a los que se aplican.

De acuerdo con la Asociación Internacional de Microsimulación[5] (IMA, por sus siglas en inglés), la microsimulación es una técnica de modelación que opera a nivel de unidades individuales como personas, casas, vehículos, empresas, etc. Dentro del modelo, cada unidad se representa por un registro con un identificador único y un conjunto de atributos asociados (por ejemplo, una lista de vehículos con su origen, destino y características de operación). Un conjunto de funciones (probabilidades de transición) se aplican a estas unidades conduciendo a cambios de estado y de comportamiento. Estas funciones pueden ser deterministas (probabilidad = 1) como la aplicación de impuestos, o estocástica ($0 \geq \text{probabilidad} \leq 1$) como la posibilidad de casarse o morir en un día determinado. En cualquier caso, el resultado es un estimado de las salidas al aplicar estas funciones, regularmente en gran número de pasos de tiempo, incluyendo tanto el cambio agregado general como la naturaleza distribucional de cualquier cambio. La Figura 2.1 muestra un ejemplo de microsimulación para tránsito vehicular en la que cada automóvil representa una unidad individual con atributos como velocidad, tipo y un factor de gentileza del conductor.

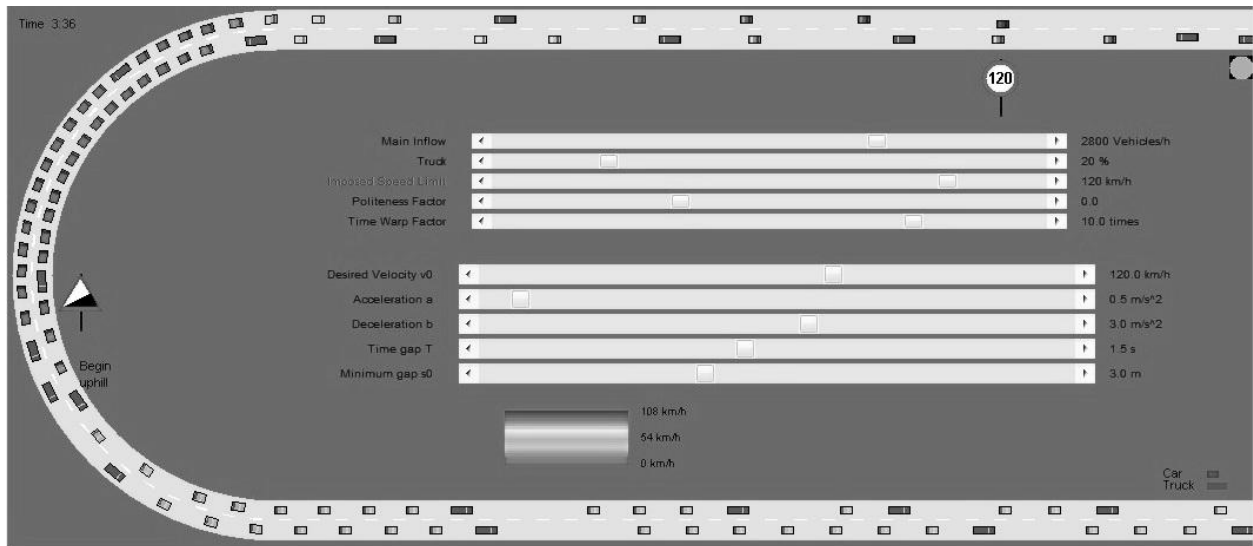


Figura 2.1 Simulación microscópica de tránsito vehicular

2.1.1. Requisitos y componentes de los modelos de simulación micro.

Los requisitos y elementos generales de los modelos de MS, se pueden resumir como:

1. datos micro apropiados, más la inclusión de los datos macro necesarios;
2. la construcción de módulos micro y macro que incluyan regulaciones y respuesta de comportamiento que refleje ciertas características de las microunidades;
3. la simulación del modelo micro en sí, modificando datos de nivel micro y macro (variaciones de parámetros);
4. el ajuste de los datos micro (ya sea antes o después de las simulaciones) para ajustarse a los datos de control (problema de ajuste);
5. la evaluación de la simulación ejecutada, ya sea que se trate del resultado de una sola simulación o de un número simulaciones.

La microsimulación está estrechamente relacionada a otros dos enfoques de nivel de individuo: Autómatas Celulares y Modelos Basados en Agentes. Es el primer enfoque el que se toma para el presente trabajo, y sobre el cual se abordan detalles a continuación.

2.2. Autómatas Celulares

Como tales, los AC son idealizaciones útiles para el comportamiento dinámico de sistemas reales en distintos campos de estudio. Actualmente los AC se utilizan para modelar sistemas físicos, biológicos, así como sistemas de eventos discretos [6].

El estudio de estos sistemas genera gran interés a través de los años por su capacidad de generar un amplio espectro de patrones de comportamiento complejos a partir de conjuntos de funciones subyacentes. Más aún, capturan muchas de las características esenciales del comportamiento cooperativo de auto-organización que se observa en sistemas reales[6].

De acuerdo con Wuensche[7], un autómata celular es un “sistema dinámico discreto que evoluciona por la iteración de una función; como en cualquier otro sistema dinámico, las variables del sistema cambian en función de sus valores actuales”

Similarmente, Ilachinski[6] define a los autómatas celulares como “una clase de sistemas matemáticos discretos en tiempo y espacio, caracterizados por interacción local y una forma de evolución inherentemente paralela”.

De manera general, un autómata celular es un modelo matemático para un sistema dinámico que evoluciona en tiempo discreto. Se trata de modelos para sistemas y procesos complejos consistentes en un gran número de componentes idénticos, simples y que interactúan localmente.

2.2.1. Historia

Los Autómatas celulares se han estudiado como parte de la teoría abstracta de la computación desde tiempos en que John von Neumann se interesó en la posibilidad de construir fábricas automáticas autorreproducibles. Von Neumann los presenta por primera vez a principios de los 50s como modelos simples de autorreproducción biológica. Desarrolló un esquema para tal autómata, en términos de un espacio celular en un arreglo bidimensional, en el que cada celda se encontraría en uno de 29 estados distintos [8]. Los detalles de la construcción de von Neumann permanecieron sin publicarse hasta el momento de su muerte en 1957, pero se editaron y publicaron subsecuentemente. En los años 1964-65, E.F. Codd trabajó en una variante que requería sólo ocho estados por celda, usando la vecindad original de 5 celdas.

El conocimiento público de los autómatas celulares puede atribuirse en su mayoría al interés de Jon Horton Conway por encontrar una configuración más simple que la de von Neumann y la exploración de sus capacidades. Algunos de sus resultados se presentaron en 1970 como un juego ecológico llamado Life, en la columna mensual de Martin Gardner “Mathematical Games” en la revista Scientific American.

La “Era Gardner” de los autómatas celulares se caracterizó por una búsqueda intensa de configuraciones “interesantes” en Life. Muchos resultados se obtuvieron, pero era inevitable que el campo se saturara conforme los conceptos imaginables de “interesante” se exploraban, sumado a las capacidades tecnológicas de la época. En las figuras Figura 2.2 y Figura 2.3 se muestran las configuraciones conocidas como “glider”, o deslizador, en diferentes evoluciones mostrando una forma de desplazamiento por el plano, así como una configuración de pistola de gliders que genera a los primeros de manera indefinida (b). Se puede observar como el conjunto de reglas, a pesar de simples, dan lugar a un comportamiento emergente no trivial.

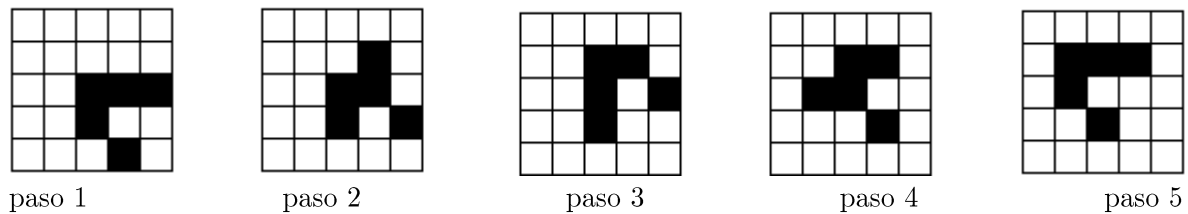


Figura 2.2 Ejemplo de configuración encontrada en Life. Evolución de un glider.

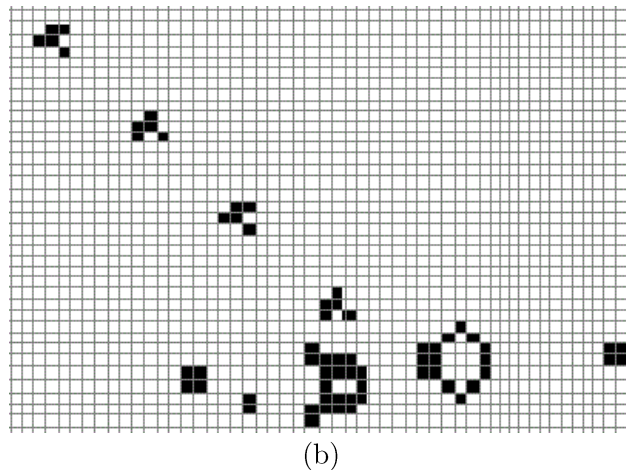


Figura 2.3 Ejemplos de configuración encontradas en el Life. Pistola de gliders.

El interés científico en autómatas celulares recibió un impulso con la investigación de Stephen Wolfram, que llevó a cabo una búsqueda por computadora de las propiedades de los autómatas unidimensionales, guiado por conceptos del campo de la dinámico no lineal y mecánica estadística.

Aunque von Neumann y Conway estaban conscientes de que existían distintas alternativas a funciones de evolución, ambos se concentraron en una sola regla que sirviera para su propósito, explorando sus consecuencias a detalle. Wolfram, por el contrario, fue uno de los primeros en comparar las historias evolutivas de un gran número de reglas diferentes. De hecho parece haber inspirado su trabajo en la teoría de sistemas dinámicos, particularmente el descubrimiento de “atractores extraños” de Stephen Smale, y los posibles paralelos que pudieron tener en teoría de autómatas.

Por la gran variación en las historias evolutivas en los autómatas celulares, Wolfram propuso 4 clases: La primera conteniendo aquellos que llegan a un campo constante; la segunda para los que alcanzan comportamiento de ciclos; la tercera es opuesta a la segunda, esto es, comportamiento caótico que no puede predecirse; y la cuarta, tal vez la más interesante, una interface entre la segunda y la tercera.

No sólo ha habido interés en resolver las propiedades estadísticas de los autómatas celulares, hay una corriente yendo en sentido opuesto, para la que los autómatas conocidos se toman como punto de partida para explorar la estadística de otros sistemas cuyas funciones de evolución son mucho más complicadas. La esperanza que se tiene es que surjan conclusiones estadísticas válidas para sistemas dinámicos que sean más simples que las gobernadas por ecuaciones diferenciales.

Aunque gran parte del trabajo teórico con AC se ha confinado a las Matemáticas y a las ciencias de la Computación, ha habido numerosas aplicaciones a física, biología, química, bioquímica, geología, entre otras disciplinas. Los AC han sido usados incluso como versiones discretas de ecuaciones diferenciales parciales en una o más variables espaciales [6], sobre todo desde la publicación de trabajos como el de Toffoli [9] en donde se les presenta como un enfoque radical hacia los sistemas dinámicos respecto al enfoque tradicional de ecuaciones diferenciales parciales y discute el problema de codificar las variables de estado y las leyes de un sistema físico en este tipo de configuraciones.

2.2.2. Componentes de un AC

En general, un autómata celular se especifica como [10]:

$$A = \{L, H, S, f\}$$

donde:

$L = \{(i, j) | 1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq M\}$, es una lattice regular de $N \times M$, con condiciones de frontera definidas;

H , es un conjunto finito de celdas que definen la vecindad de interacción de cada celda;

S , es un conjunto finito de valores de estado de la celda;

$f: S \times S^{|H|} \rightarrow Q$, es la función de transición de estado.

A continuación se describen cada uno de estos componentes.

2.2.2.1. Lattice

Una de las propiedades fundamentales de un AC es el tipo de grid de celdas en el que se construye. La forma más simple es una línea unidimensional. En dos dimensiones, se puede considerar una teselación con la que sólo se tienen 3 polígonos regulares posibles cubriendo de manera uniforme el plano: triángulos, cuadrados y hexágonos; aunque es posible también utilizar polígonos irregulares o tener configuraciones con el plano cubierto de forma irregular. En la Figura 2.4 se muestran distintas configuraciones para un arreglo de celdas bidimensional.

Una lattice regular d-dimensional $\mathbb{Z}^d$ es la opción más común para la construcción de AC[11], permitiendo que el arreglo tenga cualquier número finito de dimensiones, aunque los más común sea trabajar con valores entre 1 y 4.

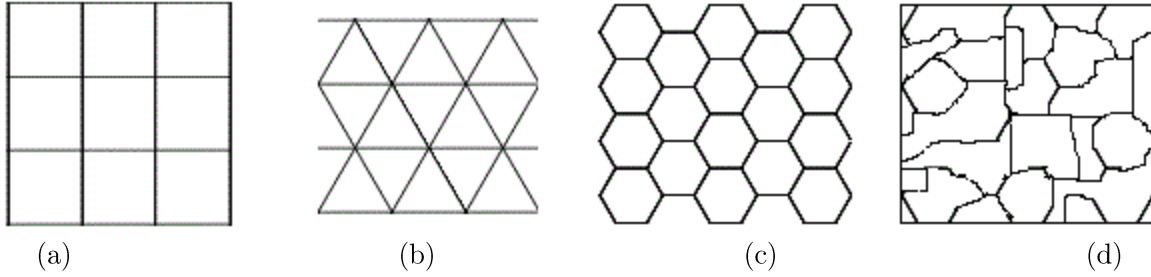


Figura 2.4 Distintas configuraciones de celdas para un grid bidimensional: (a) cuadrada, (b) triangular, (c) hexagonal, (d) irregular

2.2.2.2. Condiciones de frontera

Los AC se exploran con experimentos computacionales en los que la lattice tiene que considerarse finita. Por esto, para las lattices finitas, es necesario imponer condiciones que definan el conjunto de vecinos para las células en las fronteras de la lattice; condiciones de frontera.

En una lattice, las fronteras opuestas se pueden unir y se obtiene lo que se llama frontera cerrada o periódica. En una dimensión esto conduce a un anillo, en dos dimensiones conduce a un toroide (Figura 2.5). Si se toma la vecindad con el mismo valor de las celdas en la frontera, se tiene una frontera reflejante. Si cuando un individuo se sale de la lattice, este se pierde para siempre, se tienen condiciones de frontera absorbente o abierta. Además, pueden definirse distintas configuraciones híbridas de acuerdo a las necesidades del problema que se trate.

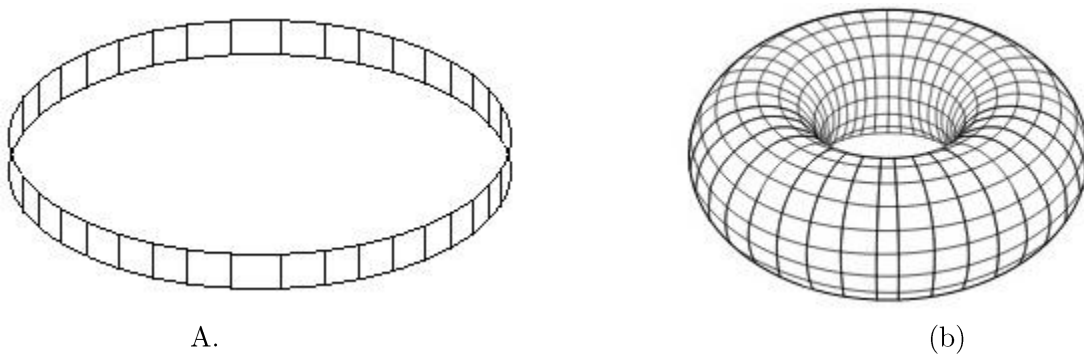


Figura 2.5 Visualización de frontera cerrada para una (a) y dos (b) dimensiones

2.2.2.3. Vecindad

La vecindad de interacción de una celda r especifica un conjunto de celdas de la lattice que influncian el estado de la celda r a cada paso de tiempo. Su tamaño y topología no dependen de la celda de la lattice, sino del problema a modelar. La vecindad se define como un conjunto ordenado:

$$N_b^I(r) = \{r + c_i : c_i \in N_b^I\} \subseteq L \quad 1.1$$

Donde N_b^I es una plantilla de vecindad que puede escogerse de muchas maneras. Ejemplos comunes son la vecindad de von Neumann y la vecindad de Moore, la primera con 4 elementos (norte, sur, este, oeste) y la segunda con 8 (los 8 más cercanos). Ver Figura 2.6.

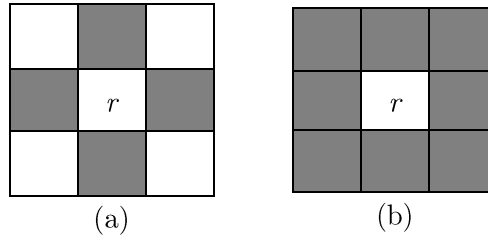


Figura 2.6. Vecindad de von Neumann (a); y Moore (b)

2.2.2.4. Estados

A cada celda $r \in L$ se le asigna un valor de estado $s(r) \in S$ que se escoge de un conjunto finito de estados elementales S , i.e.

$$s : L \rightarrow S \quad 1.2$$

Los elementos de S pueden ser números, símbolos u otros objetos.

Una configuración global $s \in S^{|L|}$ del autómata se determina por los valores de estado de todas las células de la lattice. La Figura 2.7 muestra un ejemplo de configuración global para una lattice unidimensional con condiciones de frontera periódicas.

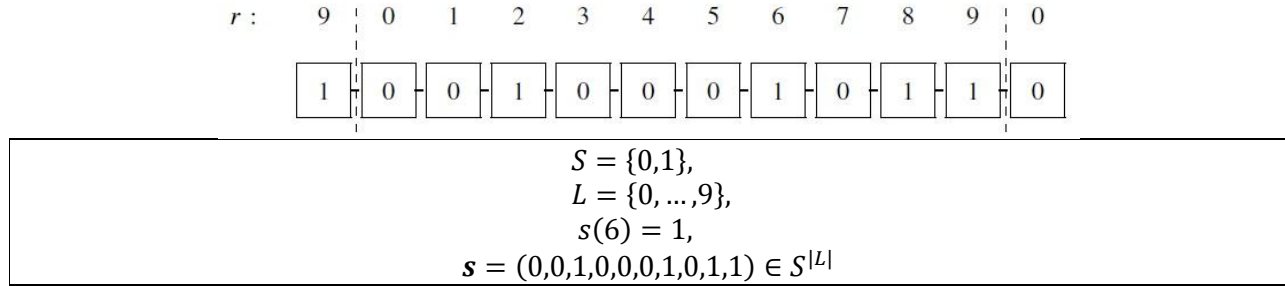


Figura 2.7 Ejemplo de configuración global s en una lattice unidimensional

2.2.2.5. Función de transición de estado

La dinámica del autómata se determina por una función de transición local R , la cual especifica el nuevo estado de la celda como un función de su configuración de vecindad, i.e.,

$$R: S^H \rightarrow S, \text{ donde } H = |N_b^l| \quad 1.3$$

La función es espacialmente homogénea, i.e., no depende explícitamente de la posición de la celda r .

En los AC deterministas la función local es determinista; i.e., la función de transición local produce un único estado siguiente para cada celda. Por tanto, para condiciones iniciales fijas la evolución futura del autómata es predecible y determinada de manera única.

En un AC probabilístico la función de transición local especifica una distribución de probabilidad independiente de tiempo y espacio de los estados siguientes para cada configuración de vecindad posible. De esta manera, cualquier regla local determinista puede verse como un caso especial de una regla probabilística con probabilidad 1 para la regla definida.

Asumiendo una actualización síncrona del AC, la función local se aplica simultáneamente a cada celda de la lattice. Entonces, la dinámica global se especifica por una función global $R_g: S^{|L|} \rightarrow S^{|L|}$ de modo que para cada configuración global $s \in S^{|L|}$,

$$R_g(s)(r) = R(s_{N(r)}) \quad \forall r \in L$$

La dinámica global, entonces, queda completamente definida por la función local R

La configuración global en pasos discretos subsecuentes t , queda definida como:

$$s(t) = (s(r_1, t), \dots, s(r_{|L|}, t)) \in S^{|L|}$$

donde:

$$s(r_i, t) \in S \text{ es el estado de la celda } r_i \text{ en el paso de tiempo } t$$

La configuración local de la celda r en el tiempo t está dada por $s_{N(r)}(t)$. Para cada configuración global, el desarrollo temporal del sistema está determinado por:

$$s(t+1) = R_g(s(t)),$$

y, la dinámica de un estado $s(r, t)$ es seguida por:

$$s(r, t+1) = R(s_{N(r)}(t))$$

2.3. Mercado de valores

Desde los años 70 han ocurrido una serie de cambios significativos en el mundo de las finanzas; en esa década comienza a operarse con divisas en los mercados financieros y su valor se determina por el mercado de intercambio extranjero, en un mercado activo las 24 horas del día en todo el mundo; desde entonces, el volumen de intercambio extranjero ha ido creciendo a un ritmo impresionante. Hoy en día, los mercados facilitan la operación de enormes cifras de dinero, activos y bienes en un ambiente competitivo global.

Otra revolución se dio en los años 80, con la introducción de la operación electrónica. El almacenamiento electrónico de contratos financieros (o de precios de compra/venta) tuvo lugar al mismo tiempo que se expandía la operación electrónica, dando como resultado la cantidad de datos financieros almacenados que se tiene actualmente. Este tipo de datos se caracteriza por la propiedad de ser de alta frecuencia.

Muestra de la enorme evolución de este tipo de mercados es la bolsa de valores electrónica NASDAQ, la primera bolsa de valores electrónica del mundo, con más volumen de intercambio por hora que cualquier otra bolsa de valores en el mundo. La Figura 2.8 muestra su posición dentro de las 5 bolsas más grandes, en cuanto a capitalización de mercado, en el mundo al 2011.

La enorme expansión de los mercados financieros requiere fuertes inversiones monetarias y recursos humanos para alcanzar una cuantificación confiable y una minimización de los riesgos para las instituciones financieras involucradas [12]

La importancia del mercado financiero radica en que desempeña un papel central en el funcionamiento y desarrollo de la economía. Está integrado principalmente por diferentes intermediarios y mercados financieros, a través de los cuales una variedad de instrumentos movilizan el ahorro hacia sus usos más productivos. Los bancos son quizá los intermediarios financieros más conocidos, puesto que ofrecen directamente sus servicios al público y forman parte medular del sistema de pagos. Sin embargo, en el sistema financiero participan muchos otros intermediarios y organizaciones que ofrecen servicios de gran utilidad para la sociedad [13].

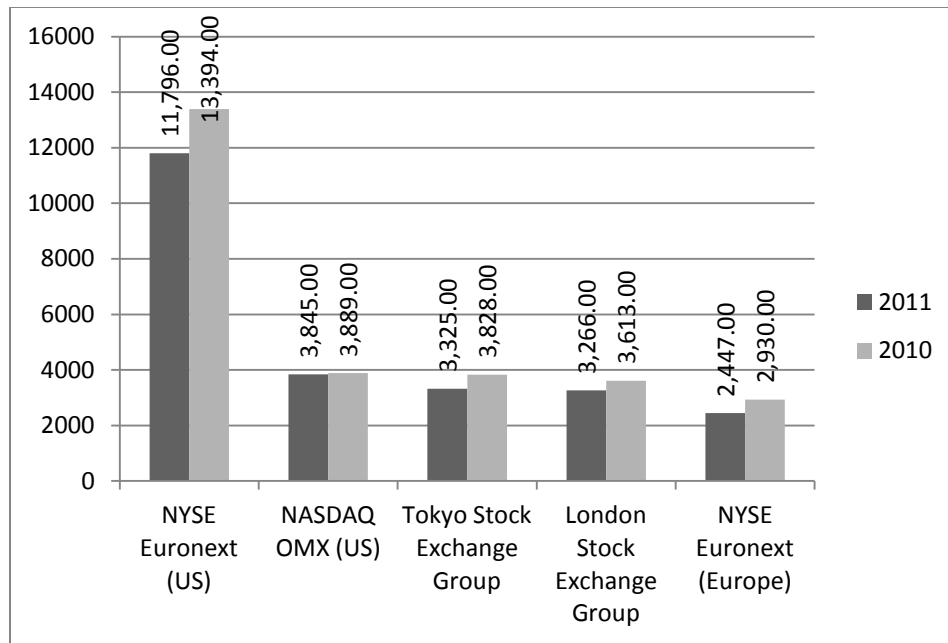


Figura 2.8 Bolsas de valores con la mayor capitalización de mercado al 2011, en miles de millones de dólares[14].

2.3.1. Definición del mercado de valores

La definición de mercado, en el campo de las finanzas, depende mucho del punto de vista del inversionista, que se enfoca en un determinado grupo de activos. Para un agente de futuros del eurodólar el mercado son “rojos”, “verdes”, “azules” y “dorados” (nombres dados a los contratos que expiran en uno, dos, tres o cuatro días, respectivamente). Para un jubilado, el mercado es un conjunto de fondos mutuos. Más aún, en general el inversionista tiene un horizonte de inversión específico. Un inversionista de día puede pretender tener beneficios a solo unas horas de haber realizado una decisión de inversión. Un jubilado tiene un horizonte de inversión del orden de unos años [15].

Por tanto, el mercado para un inversionista se representa por un conjunto N de valores y un horizonte de inversión τ . Estos valores pueden ser cualquier tipo de activo comerciable: bonos, bienes de consumo, fondos mutuos, divisas, etc. Denotamos el valor, o el precio, en un tiempo genérico t de los valores en el mercado por el vector N -dimensional P_t [16].

De manera más general, definimos a los mercados financieros como aquéllos en los que se intercambian activos con el propósito principal de movilizar dinero a través del tiempo [13].

Los mercados están integrados fundamentalmente por los mercados de deuda, el mercado cambiario y los mercados de acciones.

2.3.2. Mercado de deuda

El mercado de deuda es la infraestructura donde se emiten y negocian los instrumentos de deuda. El mercado de deuda también se conoce con otros nombres dependiendo del tipo de instrumentos de deuda negociado. Por ejemplo, si en el mercado se negocian principalmente instrumentos de deuda que pagan una tasa fija entonces se denomina mercado de renta fija.[17]

Los instrumentos de deuda son títulos, es decir documentos necesarios para hacer válidos los derechos de una transacción financiera, que representan el compromiso por parte del emisor (en este caso la entidad) de pagar los recursos prestados, más un interés pactado o establecido previamente, al poseedor del título (o inversionista), en una fecha de vencimiento dada

2.3.3. Mercado cambiario

El tipo de cambio es el precio de una unidad de moneda extranjera expresado en términos de la moneda nacional, i.e., el número de unidades de moneda nacional que debe entregarse para obtener una moneda extranjera, o similarmente, el número de unidades de moneda nacional que se obtienen al vender una unidad de moneda extranjera.

El mercado cambiario o de divisas es el mercado en el cual se negocian las distintas monedas extranjeras. En ese mercado se compran y se venden monedas de distintas naciones, permitiendo así la realización de cualquier transacción internacional. Los principales participantes del mercado cambiario son instituciones financieras como bancos comerciales, casas de cambio y las bolsas organizadas de comercio o de valores. Un banco central también puede participar como comprador y vendedor de divisas al mayoreo.

Los mercados cambiarios facilitan el comercio internacional ya que permiten la transferencia del poder de compra de una moneda a otra. Así, los agentes de un país pueden realizar ventas, compras y otros tipos de negocios con los agentes de otras naciones.

2.3.4. Mercado accionario

Este mercado está constituido por la oferta y la demanda de fondos para ser utilizados a largo plazo, fondos que se emplearán en la adquisición de activos fijos y en la ejecución de programas que permitirán la existencia de las organizaciones [18].

Cuando una empresa requiere de capital, tiene básicamente dos formas de obtenerlo, una es a través de préstamos en forma de créditos o títulos de deuda, y la otra mediante la emisión de capital nuevo. La principal diferencia entre estas dos fuentes de financiamiento radica en que, con los préstamos, las empresas están obligadas a pagar alguna forma de interés a la persona o institución que les otorga el financiamiento, mientras que con la emisión de capital, las empresas sólo efectúan pagos a los inversionistas si la empresa genera utilidades. Esta diferencia hace que la emisión de capital sea menos riesgosa para las empresas pero más riesgosa para los inversionistas.

Los títulos que representan el capital invertido en una compañía se conocen como acciones y pueden tener diferentes características dependiendo del poder de votación que el poseedor de las acciones tenga en la empresa, las utilidades a las que tiene acceso o el porcentaje de la empresa que representa. Por ejemplo, las acciones comunes u ordinarias son aquellas que, de acuerdo con los estatutos sociales de la emisora, no tienen calificación o preferencia alguna, tienen derecho a voto general interviniendo en todos los actos de la vida de la empresa y sólo tienen derecho a dividendos, es decir, a pagos periódicos provenientes de las utilidades generadas por la empresa, después de que se haya pagado a las acciones preferentes.

2.3.5. Acciones

Las compañías con más de un dueño se dividen en acciones que representan una fracción de la propiedad de la compañía. En una compañía pública, las acciones se pueden comprar y vender de manera libre en los mercados financieros, mientras que en una privada uno debe contactar a los dueños directamente, y la transacción puede ser gobernada (o imposibilitada) por reglas de propiedad privadas. Los datos con los que se trabaja en modelos de mercado lidian con los primeros, dado que para los segundos no existen datos disponibles[19].

A veces, más de un tipo de acción está disponible para una compañía dada. Se pueden tener derechos de voto o dividendos. Por ejemplo, los de tipo “preferred” se diferencian de los comunes en que se les da un dividendo fijo que se les debe pagar primero cuando existan. Este tipo

también tienen precedencia sobre los comunes en caso de que la compañía sea liquidada. Por otro lado, los shares comunes pueden recibir una cantidad ilimitada de dividendos y tener derechos de voto.

2.3.6. Índices bursátiles

Los índices bursátiles son índices que reflejan el movimiento de precio de los mercados de acciones. Son calculados y publicados por mercados de intercambio (e.g. NYSE, Euronext), compañías publicadoras (e.g. Dow Jones, McGraw Hill (S&P), Financial Times), o bancos de inversión (e.g. Morgan Stanley). Sirven como referencia para administradores de portafolios. Los derivados de acciones como los futuros y las opciones se ligan a un índice bursátil dado, entre los más famosos está el índice de futuros S&P 500. Derivados más complejos, incluyendo los que se venden al público en general como los fondos de Guaranteed Capital, también se ligan a menudo al desempeño de los índices bursátiles[19].

Se supone que cada índice refleja el desempeño de una categoría dada de stocks. Esta categoría se define típicamente en términos geográficos (mundial, continental, nacional, mercado específico), capitalización del mercado (gran capitalización, mediana capitalización, pequeña capitalización), sector económico (e.g. tecnología, transporte, banca). El número de stocks representados en un índice dado varía desde unas cuantas decenas (Bel-20, DJIA) a varios miles (MSCI World, NYSE Composite, Russell 3000).

La mayoría de los índices bursátiles son promedios de precio determinados por la capitalización del mercado. La capitalización del mercado representa el valor total en el mercado de una compañía; está dado por su precio actual de share multiplicado por el número de shares remanentes (i.e. el número de shares requeridas para poseer el 100% de la compañía).

2.3.7. Participantes y mecanismos del mercado

En principio, los mercados financieros permiten dos poblaciones complementarias: empresarios que tienen proyectos industriales pero necesitan fondos, y por tanto requieren inversionistas que tengan el dinero para invertir y compartir, a la larga, tanto los beneficios futuros como los

riesgos de tales proyectos. Nótese que los 'empresarios' pueden ser individuos privados, compañías o estados. Los instrumentos de inversión son regularmente acciones o bonds[19].

Podemos encontrar de igual manera distintas posiciones de inversión:

- Para operaciones de cobertura (*hedgers*), en donde se busca reducir en lo posible el riesgo de cambios de precio de un activo financiero. Permite, por ejemplo, que productores tengan ingresos estables por medio de la venta de contratos futuros.[20]
- *Formadores de mercado*, que son agentes que tanto pueden ejecutar órdenes de compra y venta como llevarlas a cabo por cuenta propia. Estando preparados para comprar o vender en cualquier momento, es como crea un mercado de acciones bilateral [20]. Su función principal es la de dar liquidez y contribuir a la estabilidad de precios de los valores del mercado de capitales mediante una presencia operativa permanente en la sesión de remate.[21]
- *Especuladores*, que compran y venden en mercado financieros en donde hay muchas fluctuaciones de precio con el propósito de obtener ganancia capital. A pesar de no ser considerada como una actividad real para beneficio privado, contribuye a la estabilidad de precios[20]

La manera en que los mercados abiertos fijan el precio de cualquier activo operado depende mucho del propio mercado. Los dos mecanismos principales son la operación continua (continuous trading) y los remates (auctions).

Para los remates, cada mercado tiene su propio conjunto de reglas para llevar a cabo las acciones, pero el principio general es que durante la subasta, ninguna operación tiene lugar sin que los compradores y vendedores notifiquen su intención al mercado (precio y volumen de las operaciones). Después de cierto tiempo, la subasta se cierra y todas las transacciones se hacen al precio de la subasta, determinada de modo que se maximice el número de transacciones. Las subastas son la norma en los mercados primarios, cuando nuevos bonds o acciones salen a la venta.

En los mercados de operación continua, los compradores potenciales notifican a los otros participantes el máximo precio al que están dispuestos a comprar (bid price), para los vendedores el mínimo precio se llama oferta (ask price). El mercado guarda registro de la oferta más alta (mejor oferta, o simplemente la oferta) y la mejor demanda (mejor demanda o demanda). En un instante dado, los dos precios se cotizan: el precio de oferta y demanda, que se

llaman cotizaciones. La colección de todas las órdenes para comprar y vender se llaman libro de órdenes, que es una lista del volumen total disponible para una operación a un precio dado. Nuevas órdenes de compra por debajo del precio de oferta u órdenes de compra por arriba del precio de demanda se agregan a la cola en el precio correspondiente.

Si alguien llega con una orden incondicional para comprar (orden de mercado) o con un precio límite mayor al precio de demanda actual, éste realizará la operación al precio de demanda con la persona con la menor demanda. El precio correspondiente se imprime como el precio de transacción. Si el precio de compra es más grande que el volumen de demanda, se dispara una sucesión de operaciones con precios incrementalmente mayores, hasta que se cubra el total del volumen. La actividad del mercado es por tanto una sucesión de cotizaciones (oferta y demanda) y operaciones (precios de transacción).

Capítulo 3. Estado del arte

En este capítulo se exponen los trabajos que consideran el tema de modelación del mercado financiero. Se presentan primero diferentes enfoques con los que se ha tratado la modelación del mercado para seguir después con ejemplos de modelos. Se busca destacar la inconveniencia que representan los modelos analíticos y resaltar las ventajas de modelos discretos. Dentro de los modelos basados en Autómatas celulares, se detallan 4 trabajos con distintas características que definen la base para el modelo que se plantea en este trabajo de tesis.

3.1. ¿Cómo se ha atacado la modelación del mercado de valores?

Hasta hace unos años, la mayoría de los modelos clásicos en finanzas y en particular los estudios que constituyen los pilares de este campo de investigación eran principalmente analíticos. Para alcanzar resultados analíticos en dichos modelos, se hace necesario realizar muchas suposiciones específicas, algunas de las cuales son muy irreales, sin embargo necesarias por cuestiones de tratabilidad para llegar a obtener resultados.

Un ejemplo de este tipo de modelos es el Modelo de Fijación de Precios de Activos de Capital (CAPM, por sus siglas en inglés) de Sharpe-Lintner, que considera a los inversionistas racionales como aquellos que maximizan la utilidad esperada [22, 23, 24]. Para obtener el CAPM se necesitan hacer suposiciones tales como: expectativas homogéneas respecto a la distribución futura de rendimiento (que se asume es normal), que no haya costos de transacciones, que todos los inversionistas tengan el mismo periodo de “holding”, entre otras. Obviamente, estas suposiciones no coinciden con los hechos reales (en particular por la existencia de impuestos y costos de transacción). Muchas de las suposiciones específicas subyacentes a los modelos clásicos son irreales.

Respecto a la modelación del comportamiento de los componentes del mercado, los agentes inversionistas, generalmente se hace una clasificación en dos regímenes opuestos: uno que asegura que todos los inversionistas maximizan alguna función de utilidad y actúan de acuerdo a la Teoría de Utilidad Esperada (EUT, por sus siglas en inglés). El otro extremo: un caos en el cual los inversionistas compran o venden acciones de manera aleatoria, completamente desligados del valor fundamental del activo.

Actualmente, más economistas creen en la cuasi-racionalidad o racionalidad-limitada, que cae entre estos dos escenarios. Se cree que la cuasi-racionalidad describe de mejor forma cómo operan los individuos en los mercados financieros. En la cuasi-racionalidad, los inversionistas también maximizan alguna función de utilidad (actúan de acuerdo a algún modelo) pero puede haber algún nivel de irracionalidad. Por ejemplo, no pueden actuar bajo señales erróneas o información incorrecta, se basan en análisis técnico que no está relacionado con el valor fundamental del activo, entre otras técnicas. Tales inversionistas, que no siguen de manera estricta la EUT, son referidos como “noise traders” o “agentes ruidosos”.

En los modelos con agentes ruidosos, las órdenes de compra y venta de los mismos se determinan por algún proceso aleatorio, con lo que se obtiene un precio de mercado con creencias heterogéneas así como ruido.

El nivel de utilidad de los inversionistas más sofisticados aumenta con la existencia de agentes ruidosos: permite que puedan operar tanto en los activos seguros e inseguros, de otro modo solo podrían operar con los activos seguros.

El dilema al que se enfrenta la investigación en finanzas es el cómo ajustar los modelos de modo que sean lo más realistas posibles y, aún con el modelo modificado, poder resolverlo analíticamente. Entre más se ajustan los modelos a situaciones de la vida real, menos resolubles se vuelven. Por tal motivo, los modelos clásicos en finanzas basados en utilidad esperada han sido atacados por los siguientes frentes:

- Algunos de las suposiciones específicas de cada modelo son irreales.
- Aún cuando las suposiciones se dejen intactas, los estudios experimentales, particularmente la Teoría de las perspectivas, pone en duda la validez del paradigma de utilidad esperada, que es la base de estos modelos.
- Los estudios empíricos no soportan o soportan muy poco estos modelos.

Otros enfoques han sido sugeridos por diversos autores para atacar este problema, y uno de ellos es la Simulación Microscópica (SM). La idea principal de la metodología de la SM es estudiar sistemas complejos representando cada uno de sus componentes de manera individual en una computadora y simular el comportamiento del sistema completo, manteniendo el rastro de todos los elementos y sus interacciones en cada periodo de tiempo. A través de la simulación, se puede llevar registro de las variables globales o "macroscópicas" que sean de interés, así como estudiar su dinámica. La ventaja principal del método de SM es que, a diferencia de los métodos analíticos, no fuerza a hacer suposiciones de simplificación por cuestiones de tratabilidad [22].

Con la microsimulación se estudia un sistema complejo modelando directamente sus elementos individuales y sus interacciones. El comportamiento macroscópico del sistema emergerá

eventualmente de la dinámica micro. La MS ha mostrado gran potencial para modelar de manera más realista la dinámica de sistema complejo en economía y finanzas. Además, facilita las pruebas de modelos y teorías económicas y financieras existentes, así como el desarrollo de nuevas teorías modelos. En la actualidad, la mayor parte de la investigación de MS en finanzas se enfoca en entender las características de mercados financieros. Para esto, se han desarrollado varios modelos de MS del mercado financiero, sin embargo, aún no es claro cuáles aspectos son los responsables de producir los hechos estilizados, o si todos los ingredientes son necesarios para explicar las observaciones empíricas [25].

Dentro del enfoque de SM se encuentran los modelos basados en autómatas celulares, una clase de sistemas dinámicos, discretos espacial y temporalmente, caracterizados por interacción local y una forma de evolución inherentemente paralela. El estudio de estos sistemas ha generado gran interés por su capacidad para generar un amplio espectro de patrones complejos a partir de conjuntos de funciones subyacentes. Más aún, los AC parecen capturar muchas de las características del comportamiento complejo cooperativo de auto-organización que se observa en sistemas reales.

El mercado de intercambio está conformado por inversores con cierta independencia, que toman decisiones de compra o venta y realizan análisis del mercado de acuerdo a la información de la que disponen. Ya sea que se trate de agentes aglomerados en grandes instituciones o sólo de inversionistas casuales, todos contribuyen a una serie de mecanismos e interacciones para el funcionamiento del sistema de mercado. Se pueden tomar las reglas simples que determinan la supervivencia del sistema, y si se añade un espacio de simulación basado en la interacción de agentes discretos, con cada agente ocupando una celda, el modelo de comportamiento se vuelve un AC.

La interacción entre agentes económicos en mercados financieros es un área de investigación en donde la idoneidad del enfoque de los AC y su potencialidad ha sido experimentada, como en el trabajo que se realiza en [26] o [27] en donde se proponen modelos estocásticos que reproducen la tendencia al comportamiento en clústers o redes de trabajo, un fenómeno muy conocido en este contexto.

A continuación describimos diferentes aproximaciones de modelos de Mercados Financieros.

3.1.1. Modelos no basados en AC

Antes del enfoque de AC, se crearon algunos modelos de simulación microscópica para el mercado de valores. Desde estos se observa la importancia de la definición de las interacciones entre los agentes y la discretización de sus posturas en compra, venta y abstención, agentes ruidosos e imitación, características que se mantiene en modelos más recientes.

3.1.1.1. Modelo de Cont-Bouchaud

En el trabajo de Qiu y Kandhai [27] se presenta un modelo de mercado especulativo como un repositorio de N agentes cuyas localizaciones no son importantes. En lugar de clasificar agentes en ciertos tipos, como se hace en otras simulaciones micro, se adoptan solamente agentes heterogéneos.

Los agentes en este modelo se enfrentan a tres alternativas a cada paso de tiempo: comprar, vender o no hacer nada. Los agentes tienden a crear ligas (links) entre sí con probabilidad c/N , donde c es un parámetro de conectividad que representa la voluntad de los agentes a alinear sus acciones. La estructura de mercado resultante se describe entonces como un grafo aleatorio consistente de N vértices. Los componentes conectados corresponden a grupos de inversionistas que unen su capital en un mismo fondo. Una vez que se han creado estos clústers, los mismos coordinan, en conjunto, sus demandas individuales de modo que todo el clúster tenga las mismas creencias respecto a futuros movimientos del precio del activo. i.e. la misma demanda ϕ_i por el activo. Las variables $\phi_i, i \in [1, N]$ junto con la estructura del grafo define la configuración del mercado. Por esto, el proceso de formación de clústers en este modelo es crucial para la dinámica del precio.

De este modelo se observa que las distribuciones no Gaussianas con estelas anchas son causadas directamente por las heterogeneidades en la demanda de los distintos grupos y el comportamiento colectivo de los agentes dentro de cada clúster. Estas heterogeneidades se conectan directamente con el tamaño del clúster y el parámetro de actividad.

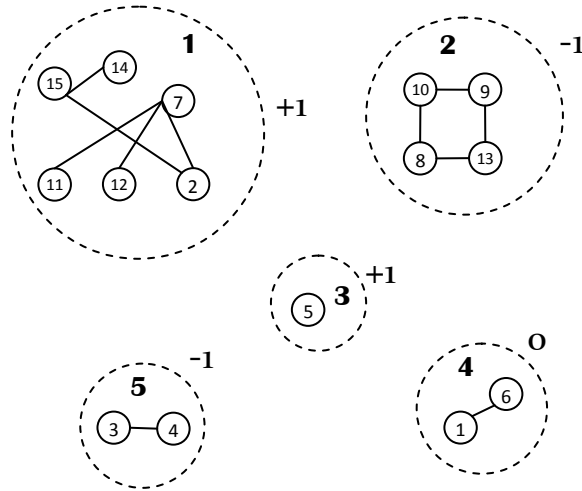


Figura 3.1. Ejemplo de una configuración del modelo Cont-Bouchaud con 5 subgrafos y los valores 0, +1 y -1 denotando su actividad: abstenerse, comprar o vender.

3.1.1.2. Modelo de Bak

De acuerdo con el modelo de [28], el mercado contiene $N/2$ cantidad de activos de solo un tipo. Hay en total N agentes en el mercado que se clasifican en dos grupos: agentes de valor fundamental y agentes ruidosos. Cada agente puede poseer a lo más un activo. Así, a cada paso de tiempo, cada agente puede ser un comprador o un vendedor potencial del activo. Cada poseedor de activos exhibe un precio al cual está dispuesto a vender, y cada comprador exhibe un precio que está dispuesto a pagar por un activo.

La localización y las relaciones geográficas de los agentes no se consideran en este modelo, i.e. la interacción se puede dar entre cualesquiera dos agentes en el mercado.

La fuerza del comportamiento de imitación depende en la fracción de agentes racionales y el modelo que se usa para la actualización de precio de los agentes ruidosos. Si esta fracción es alta, el mercado será más estable. Mientras el comportamiento de “difusión” del agente ruidoso puede apenas generar distribuciones no gaussianas de rendimiento, es el comportamiento de imitación o colectivo que produce las distribuciones de estelas anchas.

Este modelo propone diferentes simulaciones y análisis respecto al comportamiento de los agentes que conforman el mercado. Propone, por ejemplo, un mercado solo con agentes racionales, otro solamente con agentes ruidosos (una con actualización de precio independiente

para cada agente y otra con cierta racionalidad hacia el precio de mercado anterior), y un mercado formado tanto por compradores de valor fundamental y agentes ruidosos con comportamiento de imitación.

3.1.2. Modelos basados en AC

Si el espacio de simulación en el modelo basado en la interacción de agentes es un lattice discreto, y cualquiera de los agentes ocupa una celda fija, el modelo para el comportamiento de inversión se vuelve un autómata celular [29].

Dentro de los modelos de AC, se analizaron tres enfoques de modelado del mercado de valores como base para el presente trabajo. En todos los casos se toma en cuenta la dinámica de los agentes inversionistas como base para los modelos y se realiza un análisis de las características macro, considerando que “existen reglas simples y mecanismos de interacción y evolución en el sistema de mercado de valores, pero cuando el mismo evoluciona en un periodo especial, su comportamiento global puede ser estable o inestable, y el ciclo del mercado es diferente en detalle aunque similar en sus características globales”[29].

El comportamiento de los agentes se considera como un conjunto de reglas de acuerdo a las características que se pueden ver en los mercados. Los inversionistas del mercado de valores tienen su propia independencia relativa, realizan análisis de inversión y toman decisiones de acuerdo a la información que tienen. Por otro lado, hay una fuerte dependencia entre el comportamiento de los inversionistas, llamada "imitación". La mayoría de los modelos concuerda que entre más independencia exista entre estos inversionistas, mayor será la estabilidad del mercado accionista.

3.1.2.1. Modelo de Wei

En el modelo presentado por Wei [29], una autómata celular representa el mercado y cada sitio en el mismo representa a un agente de inversión. Para cada inversionista se consideran tres tipos de comportamiento: comprar, vender, y abstenerse, i.e., se toman 3 variables de estado (que denotan el comportamiento de inversión del agente en cada celda en cada tiempo): Compra, Abstención, y Venta. El comportamiento de inversión es determinado por los inversionistas en la

vecindad (vecindad de Moore) de cada celda en el paso previo, de acuerdo al principio de mayoría.

Se utiliza un parámetro de probabilidad $P_{(i,j)} \in [0,1]$ para denotar la preferencia de inversión, que a su vez refleja el comportamiento de imitación de cada inversionista, i.e., la celda en la posición (i,j) tiene probabilidad $P_{(i,j)}$ de cambiar de su estado actual al definido por la mayoría de sus vecinos

$$P_{(i,j)} \in [0,0.5] \rightarrow \text{anti} - \text{imitación}$$

$$P_{(i,j)} \in (0.5,1) \rightarrow \text{imitación}$$

La fuerza de anti-imitación o imitación depende de qué tan cerca $P_{(i,j)}$ esté de cero y uno, respectivamente.

Este modelo agrega, además, factores macro ($M_f \in [0,1]$) que aumentan o disminuyen la probabilidad de que los inversionistas compren (cuando la información positiva) o vendan (cuando la información es negativa). Con esto, M_f es un coeficiente de ajuste de la probabilidad de transferencia, causada por factores macro.

Para las simulaciones se adopta una lattice de 50x50, se define una misma probabilidad de imitación para todos los agentes de la lattice (P), y se realizan pruebas variando P y M_f además de distintas configuraciones iniciales.

Los resultados que se obtienen muestran que entre mayor sea el valor de P , más inestable se vuelve el mercado y viceversa. Algo similar sucede con los factores macro, entre mayor sea el valor de M_f , más inestable se vuelve el mercado. Y, respecto a las distintas configuraciones iniciales, se reporta que afectan a la evolución pero no hay una ley que las relacione.

Wei concluye además, que los resultados de la evolución del modelo están estrechamente relacionados con los estados iniciales, pero no existe una ley entre ellos. Los resultados de la evolución final no se pueden predecir, lo que revela la complejidad del mercado de valores.

3.1.2.2. Modelo de Bartolozzi

Para el caso del trabajo de Bartolozzi [26], uno de los objetivos del modelo de AC es la reproducción del "comportamiento colectivo". Este comportamiento se refiere a la tendencia de

la gente involucrada en el mercado de concurrir en redes o clústers de influencia. Los agentes usan entonces la información obtenida de su red para formular una estrategia comercial.

En este trabajo se modela y simula una dinámica de mercado con un modelo de AC estocástico. Los agentes del mercado se presentan como células en un arreglo bidimensional de 512x128. El agente i -ésimo en el paso discreto t se caracteriza por 3 posibles estados u orientaciones de spin: +1 para compra, -1 para venta y 0 para agentes inactivos. Los primeros dos estados son llamados "activos". Las células con valor spin 0 son agentes "inactivos." Los agentes activos se acumulan en "redes" o "clústers" vía un método de filtración directa relacionado al modelo de "incendio forestal". La información que llevan los agentes activos, esto es, su estado spin, se comparte con los otros miembros del clúster.

La dinámica comercial se relaciona con la actualización síncrona de los spins de los agentes activos, regulada por un intercambio estocástico de información entre ellos, similar al modelo aleatorio de Ising.

Una característica importante de esta simulación es que la información no se difunde por todo el lattice, sino que se limita por clústers de interacción previamente definidos. El número de conexiones de cada agente debe ser, en cada caso, finita y no extenderse por todo el mercado. En este marco, se usa un método de filtración directa para el comportamiento de manada entre agentes activos. Si se asume que la vecindad de influencia es la de Von Neumann, la filtración se fija por los parámetros:

P_h = Probabilidad de que un agente activo active a uno de sus vecinos en el siguiente paso. Esto simula el hecho de que cierta información poseída por un agente pueda inducir un agente "potencial" a unirse a la dinámica del mercado.

P_d = La probabilidad de que un agente activo se vuelva inactivo, si tiene al menos un vecino inactivo. Esto imita el hecho de que sólo los agentes en las orillas de la red, es decir, los eslabones débiles, puedan dejar el mercado.

P_e = La probabilidad de que una célula que no está en el mercado, espontáneamente decida entrar a la dinámica.

La jerarquía es necesaria para este trabajo como un aspecto real del mercado, esto es, que diferentes agentes también tienen diferentes capacidades comerciales. Se hace una suposición de que la gente que tiene mayores recursos de información, y entonces que pertenecen a clústers más grandes, pueden asociarse con inversionistas profesionales que, seguramente, son capaces de

mover una mayor cantidad de acciones comparados con el inversionista ocasional. Con esta suposición se define un peso apropiado de poder comercial a diferentes celdas.

Los resultados obtenidos por estas simulaciones se comparan con la serie de tiempo de cierre diario del índice S&P500 en un periodo de 50 años. Uno de los resultados más importantes es la explicación de las burbujas y “crashes” como sincronización de la orientación de spin de las redes con mayor influencia en el sistema de mercado.

3.1.2.3. Modelo de Bandini

Bandini [3] recoge algunas de las características de los modelos de [26, 29] y, muy probablemente, de [30] como modelo base para su trabajo, y agrega modificaciones para considerar aspectos de interacción local de los agentes. El modelo que consideran asume que las interacciones globales que ocurren entre agentes son mediadas por el precio del activo, y en particular, representa un primer paso hacia la integración de aspectos globales y locales involucrados en este problema.

Se hace además un cambio en la percepción de los agentes: se consideran dos tipos, de manera similar a como se hace en [30] con fundamentalistas y cartistas, como los que se ven envueltos en el mercado de un activo riesgoso, i.e.: Fundamentalistas e Imitadores. Estos ofrecen, a cada etapa, una transacción que puede ser positiva (cantidad de compra propuesta) o negativa (cantidad de venta propuesta). La suma de transacciones que se colectan y ofrecen por los agentes de ambos tipos es un primer índice de la tendencia prevalente en el mercado en un tiempo dado. En particular, cuando esta tendencia es positiva se tiene una "tendencia prevaleciente en el mercado" a la compra, o a la venta si es negativa.

Para los dos tipos de agentes, se consideran también diferentes estrategias comerciales que caracterizan su comportamiento. Se supone que los Fundamentalistas tienen un conocimiento razonable del valor fundamental del activo riesgoso. Este tipo de agentes proponen cantidades de transacción de acuerdo a la diferencia entre el valor fundamental que ellos perciben y a un parámetro que denota la fuerza de demanda de los fundamentalista. Por otro lado, se supone que los Imitadores son incapaces de adquirir información de manera autónoma sobre el valor fundamental del activo riesgoso. Esta suposición se motiva por lo caro, en términos de costo y tiempo, de la adquisición de información. Entonces los Imitadores basan sus decisiones en la tendencia prevaleciente que observan en el mercado. En particular, los Imitadores son agentes

comerciales que compran (o venden) activos cuando observan que la tendencia prevaleciente está por debajo (o encima) de un valor mínimo dado.

En su modelo base, se asume que los agentes no pueden cambiar su actitud de Fundamentalistas a Imitadores, de manera diferente a como se hace en [30] donde este cambio es parte de la dinámica de comportamiento. Los fundamentalistas no se ven influenciados en sus acciones por los agentes en su vecindad, sino que se comportan de acuerdo a la tendencia global del mercado. Por otro lado, los imitadores intentan capturar la tendencia del mercado siguiendo el ejemplo de sus vecinos, independientemente del precio fundamental del activo que no pueden saber.

El proceso de ajuste de precios se regula por un “market-maker” o Formador de mercado que interviene en el comercio basado en el exceso de demanda. Esto se expresa con la ecuación siguiente:

$$p(t + 1) = p(t) + \beta \cdot q(t)$$

donde:

$p(t + 1)$ es el precio del activo paso de tiempo $t+1$

$p(t)$ es el precio del activo en el paso de tiempo t

β es un coeficiente que regula la sensibilidad de cambio de precio

$q(t)$ es la suma de transacciones colectados u ofrecidas por los agentes en el paso de tiempo t , i.e.,

$$q(t) = \sum_{i=1}^N q_i(t)$$

donde:

N es el número total de agentes involucrados en el mercado

$q_i(t)$ es la cantidad de compra o venta para el agente i en el paso de tiempo t

El precio del activo en un tiempo $t+1$ es mayor que en el periodo t , cuando el exceso total de demanda en el periodo t es positivo.

Las decisiones de los distintos agentes influyen la evolución del precio del activo, que cambia de acuerdo a la tendencia general del mercado. Si la tendencia prevaleciente es vender ($q(t)$ negativa), entonces el cálculo de precio será negativo y el precio disminuirá; e inversamente si la tendencia prevaleciente es comprar ($q(t)$ positiva).

Es importante hacer notar que en este modelo la lattice utilizada es de 10×10 , algo relativamente pequeño considerando que con menos tamaño se hace más difícil observar comportamiento emergente en los modelos de AC, y que no se presentan análisis estadísticos sobre el comportamiento del precio o el rendimiento en este sentido, a diferencia de los demás modelos expuestos. Sin embargo, se presenta un análisis en el cambio del radio de la vecindad, con resultados como los mostrados en la Figura 3.2, donde se observa la influencia de los fundamentalistas de manera más inmediata al aumentar el radio, haciendo que el precio se mantenga oscilando.

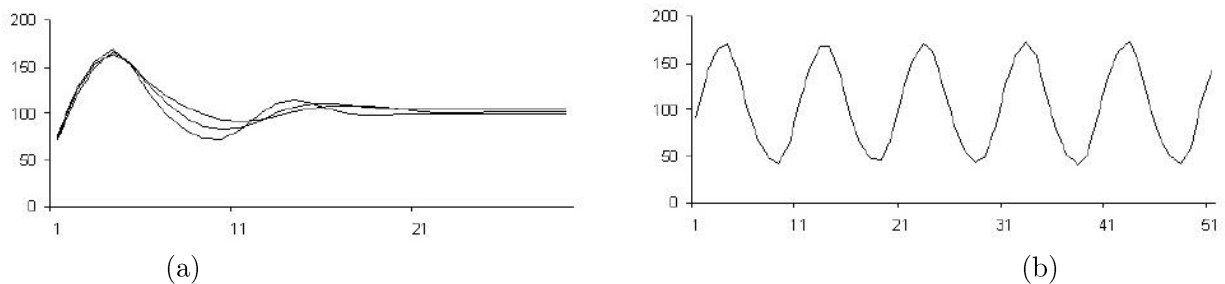


Figura 3.2 Evolución de precio con radios de 1 y 2 en una vecindad de Moore, a y b, respectivamente.

3.1.2.4. Modelo de Qiu

Para el modelo de Qiu[25], se toman los modelos de varios autores y se busca obtener las características de mayor interés observadas en el comportamiento de series de tiempo empíricas, tomadas de un mercado de valores, S&P 500 también en este caso. Estas características son llamadas Hechos Estilizados (Stylized Facts) y se enumeran como: Interacciones globales (como el agrupamiento de volatilidad), que emergen de interacciones locales; distribuciones de precio y rendimiento con estelas anchas y no como distribuciones Gaussianas; y variaciones de precio debidas a comportamiento de los agentes de inversión.

Los hechos estilizados se toman de o se comparan con otros modelos para obtener los parámetros que los provocan. De este modo, se trabaja sobre un modelo base al que se van

añadiendo características en niveles (hasta 3) en donde se alcanzan todos los comportamientos deseados.

El modelo puede confirmar los principales hechos estilizados observados en series de tiempo financieras empíricas, además de que las simulaciones y análisis mostrados sugieren que el precio y la volatilidad son reversibles a la media. Las interacciones de agentes a gran escala, que se muestran como responsables de grandes variaciones de precio, pueden formarse de interacciones locales. El agrupamiento de volatilidad se asocia con la variación de actividad de operación de los agentes, un proceso más lento comparado con la variación en la influencia de las noticias.

Las distribuciones de rendimiento con estelas anchas se relacionan tanto a grandes variaciones de precio como al agrupamiento de volatilidad, siguiendo la línea de estudio de Gopikrishnan [31]. Finalmente, describe estas distribuciones no Gaussianas como producidas por el comportamiento de los agentes en respuesta a la llegada de noticias, aún cuando se asume que la influencia de las noticias sigue un proceso aleatorio Gaussiano. La Figura 3.3 muestra un comparativo de la distribución de rendimiento de un índice de precios y resultados del modelo, contra distribuciones Gaussiana y Lorentziana.

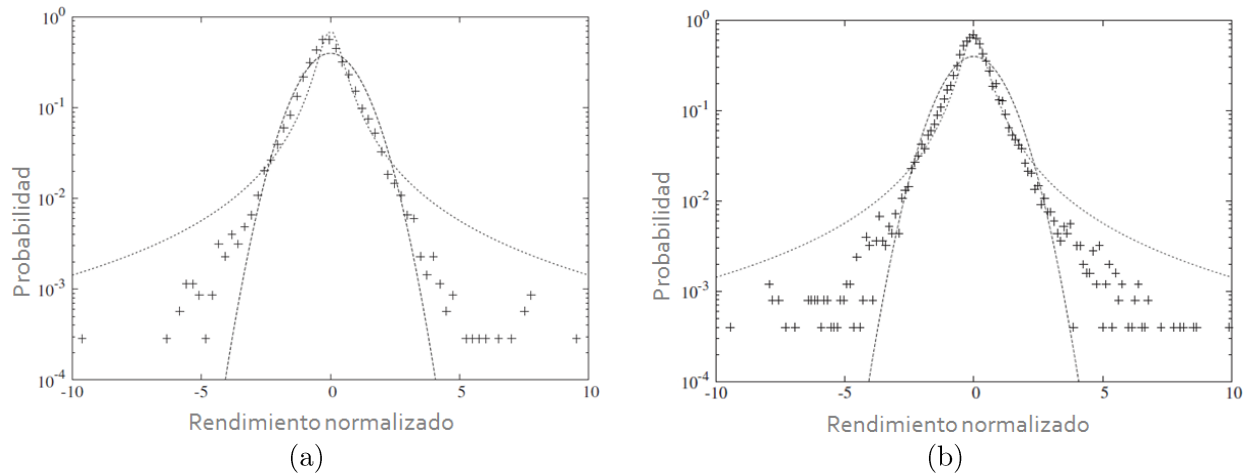


Figura 3.3. Distribución de rendimiento diario de S&P 500 en el periodo de Junio de 1950 a Junio de 2005 (a) y resultados de simulación (b), comparadas con una PDF Gaussiana y una PDF Lorentziana.

En este modelo, la actualización de precio se realiza de manera similar a como se hace en el modelo de [3], pero se toma en cuenta el número de agentes en la lattice de manera directa para dividir la cantidad total de operaciones en cada paso de tiempo, i.e.,

$$p(t + 1) = p(t) + \frac{c_p q(t)}{N}$$

donde:

$p(t + 1)$ es el precio del activo paso de tiempo $t+1$

$p(t)$ es el precio del activo en el paso de tiempo t

N es el número de agentes involucrados en el mercado

c_p es un parámetro de sensibilidad al cambio de precio

$q(t)$ es la suma de transacciones operadas por los agentes en el paso de tiempo t

El coeficiente β en el modelo de [3] se convierte en un parámetro de sensibilidad c_p , que obviamente influye en la evolución del precio en tiempo, como se muestra en la Figura 3.4

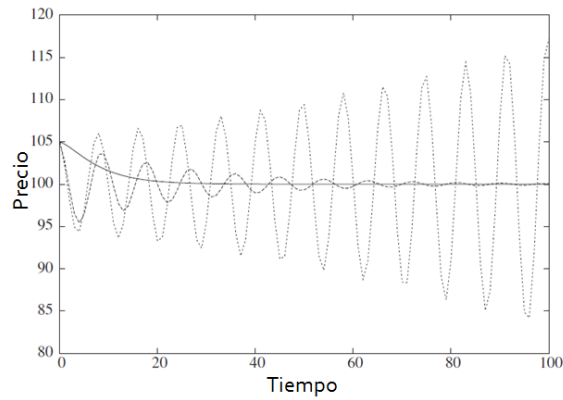


Figura 3.4. Trayectorias de precio obtenidas para distintos valores de c_p (0.1, 0.9 y 1.02).

Capítulo 4. Modelo propuesto

Nuestra propuesta para resolver el problema en esta tesis es un modelo de mercado de valores como una lattice bidimensional cuadrada de $L \times L$ en donde cada celda representa a un agente de inversión con influencia de otras celdas en una vecindad de Moore.

Dentro del modelo se incorporan agentes especulativos de dos tipos: fundamentalistas e imitadores, siguiendo el enfoque adoptado por [3, 25], y de manera aproximada a [28]. Los Fundamentalistas son agentes que están informados sobre la naturaleza del activo sobre el cual están operando y actúan de acuerdo a su valor fundamental. Estos agentes creen que el precio de activo puede desviarse de manera temporal de dicho valor fundamental, pero eventualmente regresa a él; por esto, compran o venden siempre que el precio sea menor o mayor que el valor fundamental que ellos perciben. Por otro lado, los agentes Imitadores son aquellos que no conocen, no se interesan por, o no tienen la capacidad de tiempo o económica para obtener información sobre el valor fundamental del activo, siguen a sus conocidos y adoptan la opinión de la mayoría.

Todos los agentes operan sobre un mismo y único valor. Se considera un parámetro de probabilidad de imitación, que afecta sólo a los agentes de tipo Imitador, además de factores externos que influyen en el comportamiento de inversión de cada agente en la forma de un parámetro probabilístico, afectando a todos los agentes.

A continuación se describen las componentes del modelo.

4.1. Lattice

Para este modelo se toma una lattice bidimensional con teselación cuadrada de $L \times L$ con $L=100$. Se puede trabajar también con lattices triangulares y hexagonales, pero las reglas que definen las vecindades de estas configuraciones se consideran casos especiales de las reglas de cuadro con 9 vecinos [29].

El tamaño de la lattice se vio determinado por trabajos previos [3, 26, 29, 25]: cuando se tienen lattices pequeñas (i.e. 10×10) es difícil llegar a observar los hechos estilizados en el comportamiento del sistema; por otro lado, las lattices grandes (i.e. 200×200) suponen una alta exigencia de cómputo pero sin diferencia notable respecto a otras más pequeñas en cuanto a la

posibilidad de generación del comportamiento buscado. Para $L=100$, se tiene un tamaño sin demasiada exigencia de cómputo y con el que es observable el comportamiento buscado.

4.2. Vecindad

Cada celda en la lattice representa a un agente de inversión (trader), que a su vez se ve influenciado por sus vecinos más cercanos (radio 1) en una vecindad de Moore, i.e., la vecindad de una celda r en la posición (i, j) de la lattice está dada por:

$$N_b^I(r_{(i,j)}) = \begin{pmatrix} r_{(i-1,j-1)} & r_{(i,j-1)} & r_{(i+1,j-1)} \\ r_{(i-1,j)} & & r_{(i+1,j)} \\ r_{(i-1,j+1)} & r_{(i,j+1)} & r_{(i+1,j+1)} \end{pmatrix} \quad 2.1$$

donde:

$N_b^I(r_{(i,j)})$ es el conjunto de celdas que componen la vecindad de r .

4.3. Estados

La variable de estado $s_{(i,j)}(t)$ representa el comportamiento de inversión del agente en el sitio (i, j) en el paso de tiempo t . En particular, el conjunto de estados que puede adquirir cada celda se define como:

$$s_{(i,j)}(t) \in S = \{(\tau, q_\alpha) | \tau \in T, q_\alpha \in Q\} \quad 2.2$$

donde:

Q es el tipo de transacción que está realizando el agente y puede ser cualquiera de los tres siguientes:

s_b , representando compra;

s_h , representando abstención;

s_s , representado venta, i.e.,

$$Q = \{s_b, s_h, s_s\} \quad 2.3$$

Cada tipo de comportamiento es el reflejo de la cantidad de transacciones q que el agente está dispuesto a realizar en cada paso de tiempo, i.e.,

$$q_\alpha(t) = \begin{cases} s_b, & q > 0 \\ s_h, & q = 0 \\ s_s, & q < 0 \end{cases} \quad 2.4$$

con $q \in \mathbb{Z}$

T es el tipo de agente de que se trata, y puede ser Fu para los fundamentalistas e Im para los imitadores, i.e.,

$$T = \{im, fu\} \quad 2.5$$

4.4. Función de transición

El estado de una celda en el paso de tiempo t será determinado por su propio estado y el de sus vecinos en el paso de tiempo previo, así como por las variables de control, i.e.,

$$s_{(i,j)}(t+1) = F(s_{(i,j)}(t), s_{(i,j)L}(t), R), \quad 2.6$$

donde:

$s_{(i,j)}(t+1)$, es el estado de la celda en la posición (i,j) en el paso de tiempo siguiente;

$s_{(i,j)}(t)$, es el estado de la celda en la posición (i,j) en el paso de tiempo previo;

R , son las variables de control;

F , es la función de transición del AC;

$s_{(i,j)L}(t)$, es el estado de los vecinos de la celda (i,j) en el paso de tiempo previo, i.e.,

$$s_{(i,j)L}(t) = \begin{pmatrix} s_{(i-1,j-1)}(t) & s_{(i,j-1)}(t) & s_{(i+1,j-1)}(t) \\ s_{(i-1,j)}(t) & & s_{(i+1,j)}(t) \\ s_{(i-1,j+1)}(t) & s_{(i,j+1)}(t) & s_{(i+1,j+1)}(t) \end{pmatrix} \quad 2.7$$

Bajo estas reglas, el estado del autómata celular en el mercado de valores en el siguiente paso de tiempo puede ser afectado solamente por el comportamiento de inversión de sus vecinos, su propia preferencia de inversión y los factores macro. El comportamiento de inversión de los vecinos se determina por el de la mayoría entre ellos. De acuerdo a la probabilidad dada, el estado de la celda en cuestión evolucionará al estado determinado por el principio de mayoría de los vecinos en el paso de tiempo previo.

A continuación se describen cada una de las partes que afectan la evolución del autómata en cada paso de tiempo.

4.4.1. Decisión de transición

Como se mencionó antes, el conjunto de estados posibles para cada celda en el AC está conformado por el tipo de agente (τ) y la cantidad que desea comprar o vender (q) en cada paso de tiempo. La decisión sobre la cantidad q con que cada agente está dispuesto a operar en el siguiente paso de tiempo la llamaremos *decisión de transición*, y está definida de acuerdo al tipo de agente por las siguientes reglas:

4.4.1.1. Fundamentalistas:

Los agentes del tipo fundamentalista actúan de acuerdo a la diferencia entre el valor fundamental que ellos perciben y el precio actual del activo. Cuando el precio del activo es menor al valor fundamental percibido por el agente, la cantidad a operar obtenida debe ser positiva, por lo que estará dispuesto a comprar. Por otro lado, cuando el precio del activo es mayor que el valor fundamental que percibe el agente, la cantidad a operar se vuelve negativa y el agente venderá. En el caso de que el precio del activo y el valor fundamental sean iguales, la cantidad que el agente desea comprar es 0, por lo que se considera una abstención. Se asume entonces la ecuación siguiente para definir la cantidad con que opera un agente fundamentalista.

$$q_{i, \text{fu}}^{t+1} = F - P^t \quad 2.8$$

donde:

$q_{i, \text{fu}}^{t+1}$, es la cantidad que el agente i -ésimo está dispuesto a operar en el tiempo $t+1$.

F , es el precio fundamental percibido por el agente.

P^t , es el precio del activo en el tiempo t .

Se asume que el valor fundamental se percibe por los fundamentalistas de manera precisa. El valor fundamental real de un activo está relacionado con el estado actual y esperado de la compañía que emite el activo, entre otros varios factores.

El presente trabajo no considera la modelación de las variaciones del valor fundamental, ya que el interés se centra más en las causas del comportamiento volátil del rendimiento del activo. Por esta razón, se asume un valor fundamental del activo como una constante F . Pruebas realizadas en [25] indican que la adición de variaciones en F no influye en las características del rendimiento.

4.4.1.2. Imitadores:

Se toma la cantidad promedio operada por los agentes en la vecindad de un agente de tipo imitador en el paso de tiempo previo para conocer la cantidad que se va a operar, i.e.,

$$q_{i, \text{im}}^{t+1} = \langle q_{i, \text{nb}}^{t+1} \rangle \quad 2.9$$

donde:

$q_{i, \text{im}}^{t+1}$, es la cantidad que el agente i -ésimo está dispuesto a operar en el tiempo $t+1$.

$\langle q_{i, \text{nb}}^{t+1} \rangle$, es el promedio de transacciones realizadas por los vecinos del agente.

4.5. Influencias externas

Se considera que existen influencias externas al sistema de mercado financiero que repercuten en las percepciones de los agentes sobre sus decisiones, i.e., noticias, rumores, eventos, etc., haciendo que puedan sobreestimar o infravalorar un activo.

Para los agentes imitadores se considera una preferencia de inversión como una probabilidad de imitación más un factor macro que produce una desviación sobre dicha probabilidad, y se describe en el siguiente punto. Para los agentes fundamentalistas, sin embargo, definimos un parámetro que afecta su percepción del valor fundamental del activo, haciendo que la ecuación definida anteriormente para la decisión de transición quede como:

$$q_{i, fu}^{t+1} = F\eta_{fu}^t - P^t \quad 2.10$$

donde:

$$\eta_{fu}^t = 1 + c_{fu}\phi_{fu}^t \quad 2.11$$

y,

c_{fu} , es un parámetro de sensibilidad de los agentes fundamentalistas a influencias externas.

ϕ_{fu}^t , es una variable aleatoria uniformemente distribuida.

4.6. Preferencia de inversión

La preferencia de inversión refleja el comportamiento de imitación del inversionista. $P_{(i,j)}$ denota la probabilidad de imitación de la celda (i,j) , lo que significa que su estado cambiará con probabilidad $P_{(i,j)}$ de su estado actual al definido por su vecindad. $P_{(i,j)} \in [0,1]$. Cuando $P_{(i,j)} \in [0,0.5]$, la preferencia de inversión es anti-imitación, la fuerza de este comportamiento depende de qué tan cerca $P_{(i,j)}$ esté de cero; cuando $P_{(i,j)} \in [0.5,1]$, la preferencia de inversión es imitación, la fuerza de este comportamiento depende de qué tan cerca $P_{(i,j)}$ este de uno. Cuando $P_{(i,j)} = 0.5$, la preferencia de inversión es anti-imitación. Se considera que la preferencia de imitación es la misma para todos los inversionistas, i.e., $P_{(i,j)} = P \forall i,j$ y $P_{(i,j)} \geq 0.5$.

Realizando una distribución de la probabilidad de imitación para cada uno de los escenarios posibles en los vecindarios de una celda, obtenemos la Tabla 4-1.

Tabla 4-1. Probabilidad de transición de estado

Comportamiento de vecinos	Probabilidad de transición de estado		
	Comprar	Abstenerse	Vender
Comprar	P	$(1-P)(0.5)$	$(1-P)(0.5)$
Abstenerse	$(1-P)(0.5)$	P	$(1-P)(0.5)$
Vender	$(1-P)(0.5)$	$(1-P)(0.5)$	P

Con un coeficiente de compra o venta, los factores macro aumentan o disminuyen las probabilidades de los inversionistas de comprar o vender. Cuando información de la situación macro es positiva, las probabilidades de comprar de los inversionistas aumentarán; mientras que con información negativa de las circunstancias macro, las probabilidades de los inversionistas de vender aumentarán.

$M_f \in [0,1]$ es un coeficiente de ajuste de la probabilidad de transferencia que es causada por los factores macro. Agregando este coeficiente a la Tabla 4-1, obtenemos la Tabla 4-2.

Tabla 4-2. Transición de estado con Factor Macro

Factor Macro	Comportamiento vecinos	Probabilidad de transición de estado		
		Comprar	Abstenerse	Vender
Información positiva	Comprar	$P+M_f$	$(1-P-M_f)(0.5)$	$(1-P-M_f)(0.5)$
	Abstenerse	$(1-P)(0.5-0.5M_f)$	P	$(1-P)(0.5-0.5M_f)$
	Vender	$(1-P)(0.5+0.5M_f)$	$(1-P)(0.5-0.5M_f)$	P
Información negativa	Comprar	P	$(1-P)(0.5+0.5M_f)$	$(1-P)(0.5-0.5M_f)$
	Abstenerse	$(1-P)(0.5+0.5M_f)$	P	$(1-P)(0.5-0.5M_f)$
	Vender	$(1-P+M_f)(0.5)$	$(1-P+M_f)(0.5)$	$P - M_f$

Durante el proceso de evolución, los valores que son menores a cero se toman como cero y aquellos mayores a uno se toman como 1. Al mismo tiempo, si la suma de los valores de las tres probabilidades de transferencia no es uno, deben ser ajustadas.

4.7. Actualización de precio

Las decisiones de los distintos agentes repercuten en la evolución del precio del activo, que varía de acuerdo a la tendencia general del sistema de mercado. Por esto, se necesita de una acción del mercado para balancear la oferta y demanda del activo. Dicha acción se lleva a cabo por la siguiente ecuación:

$$p^{t+1} = p^t + \frac{c_p Q^t}{N} \quad 2.12$$

donde:

p^t , es el precio del activo en el paso de tiempo t

c_p , es un parámetro de sensibilidad del precio al exceso demanda.

N , es el número total de agentes en la lattice.

y,

$$Q^t = \sum_i^N q_i^t \quad 2.13$$

donde:

q_i^t , es la cantidad operada (positiva o negativa) por el i -ésimo agente en la lattice.

4.8. Medidas de estabilidad del modelo de mercado

Para tener una medida de la estabilidad del precio y rendimiento del mercado, más que la simple observación de su comportamiento en el tiempo, hacen falta medidas numéricas de esta estabilidad para poder compararlas.

La medida utilizada para medir el acercamiento o alejamiento de la distribución de rendimiento de las distribuciones Gaussiana y Lorentziana es la curtosis.

Por otro lado, algunos autores como Di Matteo [32] han trabajado con la caracterización de las propiedades multifractales de las series de tiempo financieras, considerando una inherente multifractalidad en las mismas, por lo que esta ha devenido en ser considerada un hecho estilizado [26]. Para estudiar las propiedades multifractales del modelo hacemos uso del exponente de Hurst.

A continuación se detallan estas dos medidas implementadas en el modelo.

4.8.1. Curtosis

La curtosis es una medida de la forma o apuntamiento de las distribuciones, relativa a la distribución normal. Esto es, los conjuntos de datos con alta curtosis tienden a tener un pico distintivo cerca de la media, declinar relativamente rápido, y tener estelas anchas. Los conjuntos de datos con baja curtosis tienden a tener una punta plana cerca de la media en lugar de un pico. Una distribución uniforme es el caso extremo [33].

La curtosis, K , se define como:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^4}{(N - 1)s^4} \quad 2.14$$

donde:

N es el número de elementos en el conjunto de datos

Y_i es el valor del elemento i

$\bar{Y}$ es la media

s es la desviación estándar

La curtosis de una desviación estándar es 3, por lo que a menudo se usa la definición:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^4}{(N - 1)s^4} - 3 \quad 2.15$$

De modo que la curtosis de una distribución normal sea cero, la curtosis positiva indique distribución en pico, y la negativa una distribución plana.

4.8.2. Exponente de Hurst

El exponente de Hurst, H , se utiliza como medida de multifractalidad. Las series de tiempo financieras presentan una inherente multifractalidad, algo que puede considerarse como Hecho Estilizado [26]. Esta técnica provee un método sensible para revelar correlaciones a largo plazo en procesos aleatorios.

Cuando H está alrededor de 0.5 en una secuencia de valores de rendimiento, se concluye que los rendimientos son independientes y no correlacionados, y no hay tendencia en el valor del activo. Por otro lado, si H es significativamente mayor a 0.5, se concluye que rendimientos positivos anteceden a rendimientos positivos.

Para el caso en que H es significativamente menor a 0.5, se dice que el valor sugiere Reversión a la media, i.e., si un valor de rendimiento se aleja de la media, los rendimientos subsecuentes tienden a moverse hacia la media en lugar de alejarse.

La forma de calcularlo, para un conjunto de datos R , conformado por los valores de rendimiento en un periodo de tiempo dado, se describe en el algoritmo descrito en la Tabla 4-3

En el algoritmo se puede observar el reescalamiento en la sucesiva adición de la variación V en el rango para el que se calcula el valor del punto de Hurst. En la implementación del modelo, esta medida se adquiere de la distribución de rendimiento, por lo que es necesario un mínimo de ejecuciones: el primer N más t variaciones con las que poder obtener más de un punto y, consecuentemente, una inclinación en su línea de tendencia.

Tabla 4-3 Algoritmo para obtener el exponente de Hurst de un conjunto de datos D

Inicializar $N < |D|$, rango inicial de cálculo, una variación V y $P = \emptyset$ Valores de rango variable
 Hacer

Calcular la media M

$$M = \frac{\sum_{i=1}^N r_i}{N}, \text{ para los } N \text{ valores de } D, \text{ con } r_i \in D.$$

Calcular las desviaciones de la media x_i para cada $r_i \in D$, como

$$x_i = r_i - M$$

Calcular el conjunto Y , como:

$$Y = \{Y(n) | Y(n) = \sum_{i=1}^n x_i, \text{ para } n = 1 \dots N\}$$

Calcular el rango R , como:

$$R = \text{Max}(Y) - \text{Min}(Y)$$

Calcular la desviación estándar s , de R

$$s = \text{STDEV}(R)$$

Agregar a P la pareja de valores obtenidos como:

$$P = P + \left(\log(N), \log\left(\frac{R}{s}\right) \right)$$

$$N = N + V$$

Mientras $N \leq |D|$

$H = \text{Inclinación de la línea de tendencia de los puntos en } P.$

Capítulo 5. Simulación y resultados.

En este capítulo se presenta una serie de simulaciones sobre la herramienta desarrollada (la implementación del modelo) junto con un reflejo de los objetivos deseados en la concepción del modelo y los resultados de la ejecución del mismo. Las simulaciones se presentan de acuerdo al hecho que se busca demostrar en la implementación.

Se busca reflejar la dependencia de la evolución de precio con los valores de los parámetros del modelo y ante diferentes distribuciones de los agentes fundamentalistas así como diferentes cantidades de los mismos.

5.1. Visión general de la implementación.

La implementación del modelo y las simulaciones se realizaron bajo las especificaciones descritas en la Tabla 5-1. Una explicación más detallada se incluye en el Detalle de implementación del modelo, de este mismo trabajo.

Tabla 5-1 Plataforma de implementación del modelo.

Plataforma	Windows
Framework	.NET 3.5
Lenguaje	C#
Procesador	AMD Phenom II Quad Core 2GHz
RAM	6GB

La interfaz de la aplicación desarrollada se muestra en la Figura 5.1, junto con la Figura 5.2 y la Figura 5.3 que muestran las opciones de gráficos que se presentan en la ejecución.

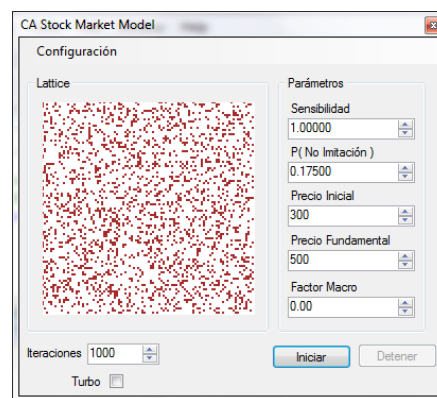


Figura 5.1 Interfaz de usuario de la aplicación para el modelo.

En la Figura 5.1 se puede observar la lattice del lado izquierdo, con agentes distribuidos en esta, ocupándola en su totalidad, y distinguiéndose su estado de compra, venta o abstención por los colores azul, rojo y blanco, respectivamente. Los controles de inicialización se muestran del lado derecho y un menú en la parte superior para modificar la configuración inicial de los agentes en la lattice.

Las figuras Figura 5.2 y Figura 5.3 Muestran las gráficas emergentes de la ejecución de la aplicación. La Figura 5.2 Corresponde a las gráficas de evolución de precio y distribución de rendimiento.

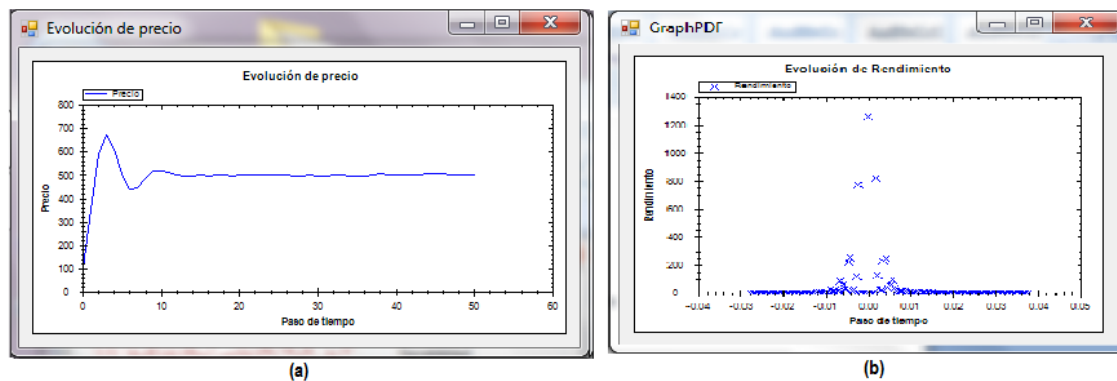


Figura 5.2 Gráficas mostradas en la ejecución de la aplicación del modelo. (a) Evolución de precio y (b) Distribución de rendimiento

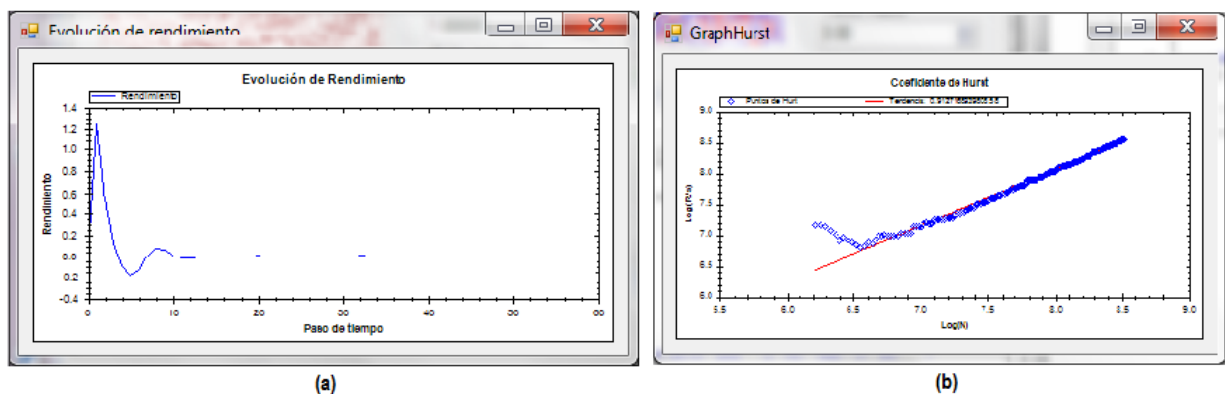


Figura 5.3. Gráficas mostradas en la ejecución de la aplicación del modelo. (a) Evolución de rendimiento y (b) Exponente de Hurst

5.2. Influencia de los parámetros

A continuación se muestran diferentes resultados obtenidos haciendo variar cada uno de los parámetros que componen el modelo a modo de comparación con los objetivos planteados durante el diseño.

5.2.1. Sensibilidad de ajuste de precio

El parámetro de sensibilidad se implementó produciendo variaciones en el precio mucho más acentuadas conforme su valor aumenta. De manera similar como ocurre con las variaciones de radio en la vecindad obtenidas por Bandini [3], la influencia de los agentes imitadores se incrementa haciendo que las fluctuaciones de precio sean mayores.

En la aplicación se define como valor máximo de este parámetro 100, aunque los experimentos muestran que el valor debe ser pequeño para evitar que el sistema tenga un comportamiento estable.

Las ejecuciones variando el valor de sensibilidad, cp, se realizan bajo el escenario de simulación descrito en la Tabla 5-2.

Tabla 5-2. Escenario de simulación con parámetro de sensibilidad variable.

Escenario de Simulación	
Parámetro	Valor
Sensibilidad a variación de precio	Variable
Probabilidad de imitación	0.1
Precio inicial	100
Precio Fundamental	300
Factor Macro	0
# de pasos de ejecución	100
# de fundamentalistas	1000

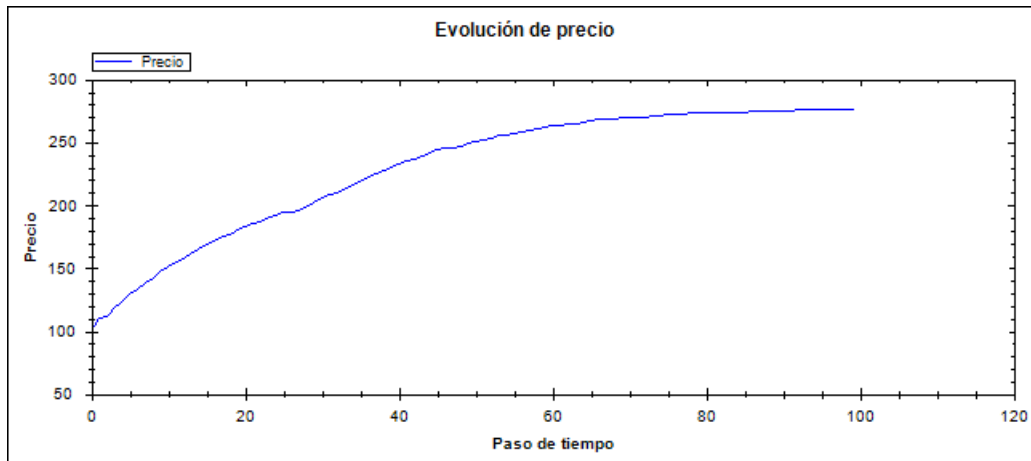


Figura 5.4. Evolución de precio con $cp = 0.5$. El precio alcanza su pico más alto al final de la ejecución.

En la Figura 5.4 y la Figura 5.5 se tiene una variación de 0.5 en el valor de la sensibilidad. El valor de 0.1 en la probabilidad de imitación permite una transición lenta al valor fundamental, pero se puede observar que a pesar de esto, el valor de sensibilidad hace que la información de los agentes imitadores pueda ser distribuída más rápidamente a los demás agentes haciendo que se alcance más rápido este valor.

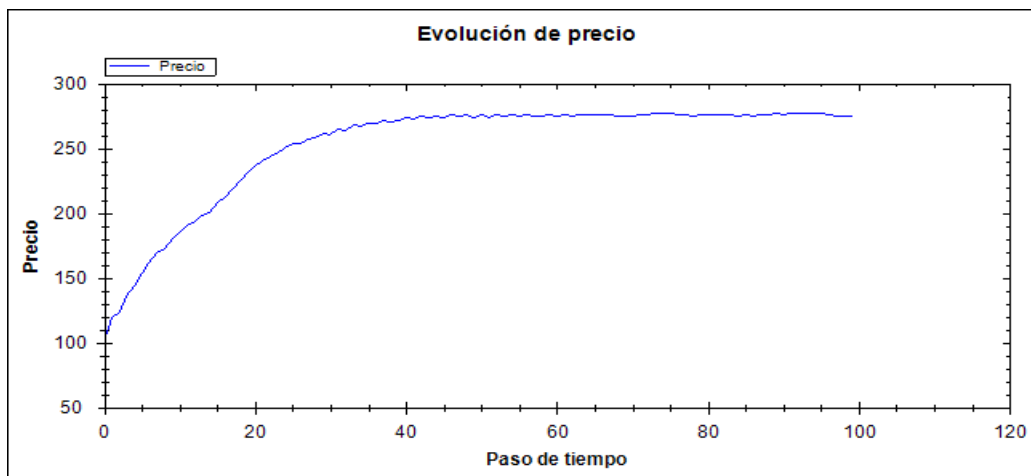


Figura 5.5. Evolución de precio con $cp = 1.0$. El precio se mantiene alrededor de las 280 unidades pero sin alcanzar el precio fundamental.

Para la Figura 5.6 se ha incrementado el valor de la sensibilidad a 10, lo que resulta en una casi inmediata subida del precio del activo, aún por encima del precio alcanzado en los dos casos anteriores. Se observa además la fluctuación en la que se mantiene la evolución del precio debida a la porción de agentes imitadores que reciben la información de forma tardía y permiten que el precio se aleje de un precio estable cada vez.

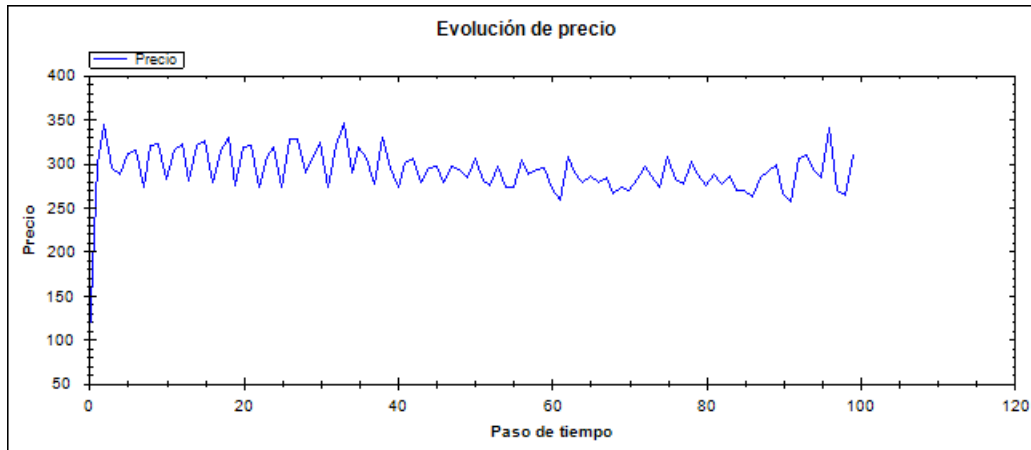


Figura 5.6. Evolución de precio con $cp = 10$. El aumento en la sensibilidad provoca una rápida subida del precio y variaciones fuertes alrededor del precio fundamental.

5.2.2. Probabilidad de Imitación

El parámetro de probabilidad de imitación se implementó en la forma como lo hace[29], produciendo de igual manera, inestabilidad en la evolución del precio conforme este valor se incrementa y mayor estabilidad conforme se reduce. Este valor es una probabilidad por lo que va de 0 a 1.

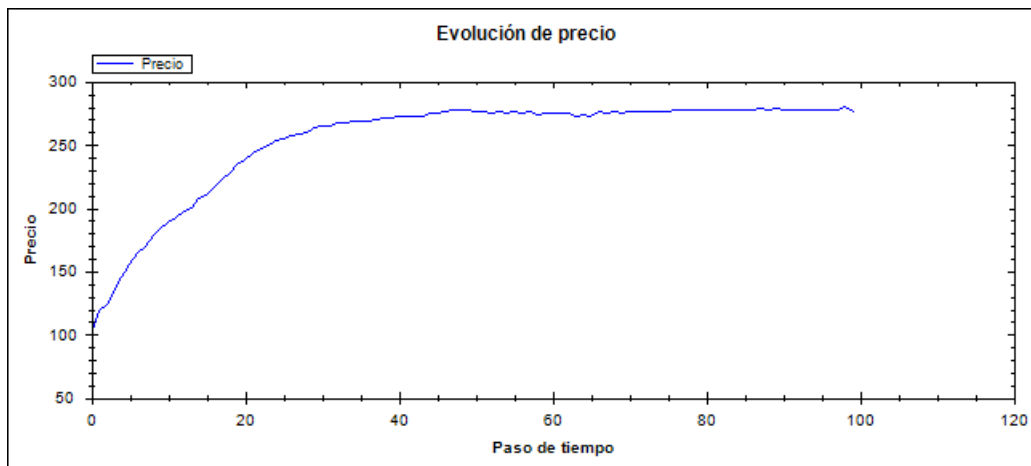
De manera similar a como se hace con el parámetro de sensibilidad, las ejecuciones se realizan variando el valor de probabilidad de imitación, P_i , primero con una variación de 0.1 a 0.5 y luego con una mayor elevando el valor hasta 0.8, esperando un cambio balanceado y considerable, respectivamente, en cada caso de prueba.

El experimento se hace bajo el escenario de simulación descrito en la Tabla 5-3.

Tabla 5-3. Escenario de simulación con parámetro de probabilidad de imitación variable.

Escenario de Simulación	
Parámetro	Valor
Sensibilidad a variación de precio	1.0
Probabilidad de imitación	Variable
Precio inicial	100
Precio Fundamental	300
Factor Macro	0
# de pasos de ejecución	100
# de fundamentalistas	1000

En la Figura 5.7 y la Figura 5.8 se muestra la diferencia entre valores de P_i de 0.1 a 0.5. Además de observarse la rápida subida de precio acercándose a un valor estable para el valor de 0.5 y la fluctuación posterior del precio, se tiene un valor más elevado al que tiende el precio en el segundo caso: mientras para $P_i = 0.1$ ronda los 275, para $P_i = 0.5$ se tiene un valor alrededor de 300. Esto se podría explicar como resultado de la mayor tendencia a imitar de los agentes, contrarrestando la influencia de los fundamentalistas y dictando, en conjunto, un aumento en el valor al que tiende el sistema de mercado.

Figura 5.7. Evolución de precio con $P_i = 0.1$. Las oscilaciones en el valor del precio son moderadas.

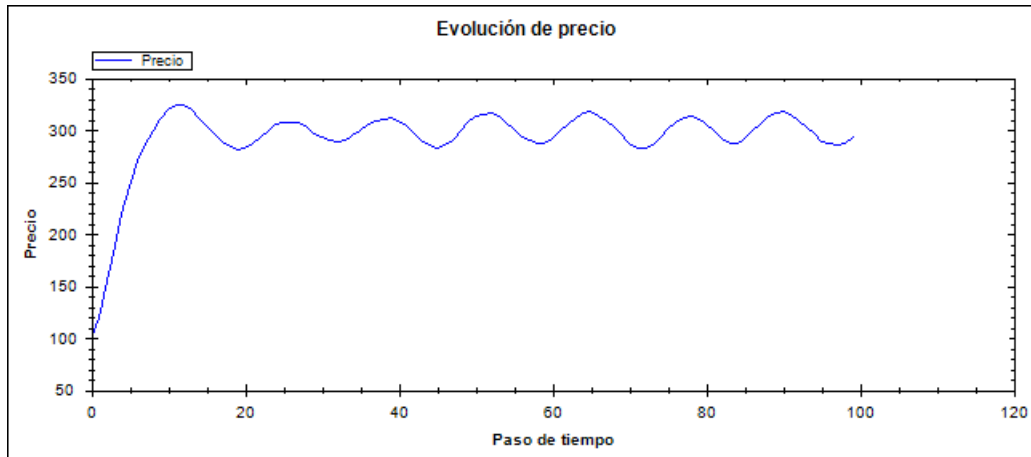


Figura 5.8. Evolución de precio con $P_i = 0.5$. Las oscilaciones en el valor del precio aumentan por encima del precio fundamental.

La Figura 5.9 muestra un aumento de P_i hasta 0.8. De manera similar a como sucede con la sensibilidad a cambios de precio, el aumento de la probabilidad de imitación conlleva a fluctuaciones en las que los agentes imitadores no permiten la estabilización del precio del mercado por la diferencia de tiempo en la que reciben la información de los imitadores, haciendo que puedan estar comprando o vendiendo en grandes cantidades mientras los fundamentalistas hacen lo contrario pero en menor cantidad.

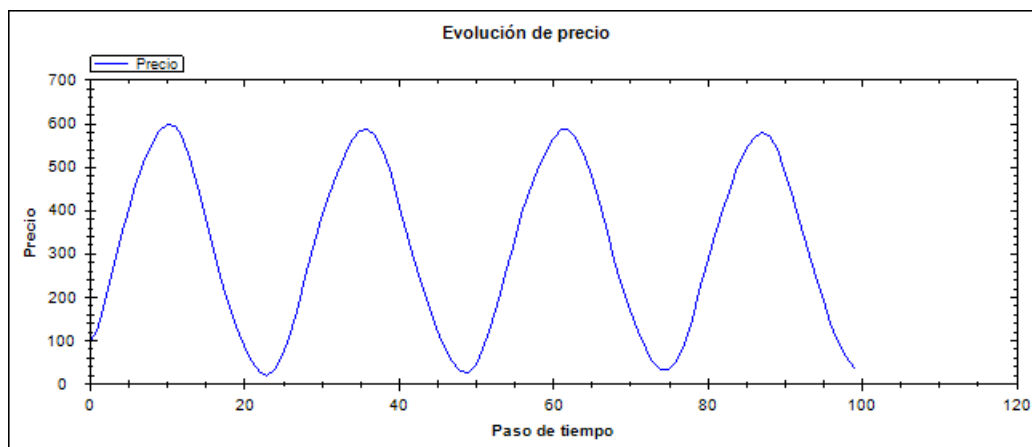


Figura 5.9. Evolución de precio con $P_i = 0.8$. Las oscilaciones se vuelven mucho más pronunciadas, aún cuando el valor de sensibilidad c_p no cambió.

5.2.3. Precio inicial y fundamental

Los valores de precio inicial y precio fundamental determinan el inicio del valor del precio del activo y el valor fundamental percibido por los agentes fundamentalistas, respectivamente. En este caso se desea mostrar la influencia del precio inicial y fundamental en el precio a que el mercado tiende conforme pasa el tiempo de la ejecución.

Los resultados muestran que, dejando de lado las influencias de los demás parámetros, es el precio fundamental el que más pauta el valor al que tiende el precio del activo.

Los parámetros que afectan el tiempo en que tarda el precio en estabilizarse son: la sensibilidad a cambio de precio c_p , y la probabilidad de imitación, P_i . Nótese en la Figura 5.12, en donde se ha hecho variar la sensibilidad c_p , el precio fundamental se alcanza mucho en un tiempo mucho más corto.

Estos parámetros están restringidos en la aplicación de 1 hasta 10000.

Las ejecuciones variando los valores de precio inicial y fundamental, se realizan bajo el escenario de simulación descrito en la Tabla 5-4

Tabla 5-4. Escenario de simulación con Precio inicial y fundamental variables.

Escenario de Simulación	
Parámetro	Valor
Sensibilidad a variación de precio	1
Probabilidad de imitación	0.1
Precio inicial	Variable
Precio Fundamental	Variable
Factor Macro	0
# de pasos de ejecución	100
# de fundamentalistas	1000

A pesar de mantener al resto de parámetros al margen buscando evitar fluctuaciones en el precio, el propio hecho permite que para un valor mayor de precio fundamental, se obtengan menos fluctuaciones que con un valor menor como se muestra en las figuras Figura 5.10 y Figura 5.11. Esto se puede entender sabiendo que el que haya una mayor diferencia entre el

precio del activo y el precio fundamental permite que los agentes fundamentalistas operen con mayor libertad, dejando un poco la influencia de la imitación. Puede observarse, además, que la variación entre el precio de tendencia (~ 125) con $F = 100$ es mayor que para $F = 1000$ (~ 1000).

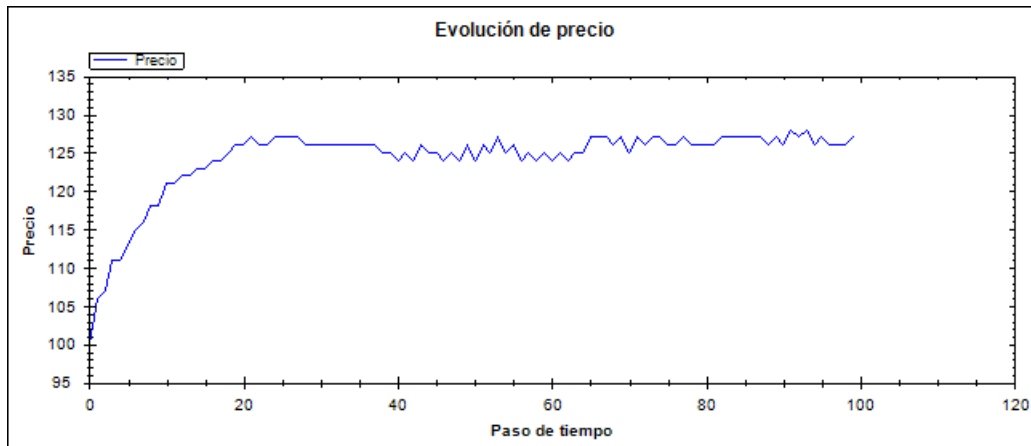


Figura 5.10. Evolución de precio con $p(1) = 100$ y $F = 150$. El corto rango entre $p(1)$ y F permite variaciones notables en la evolución del precio.

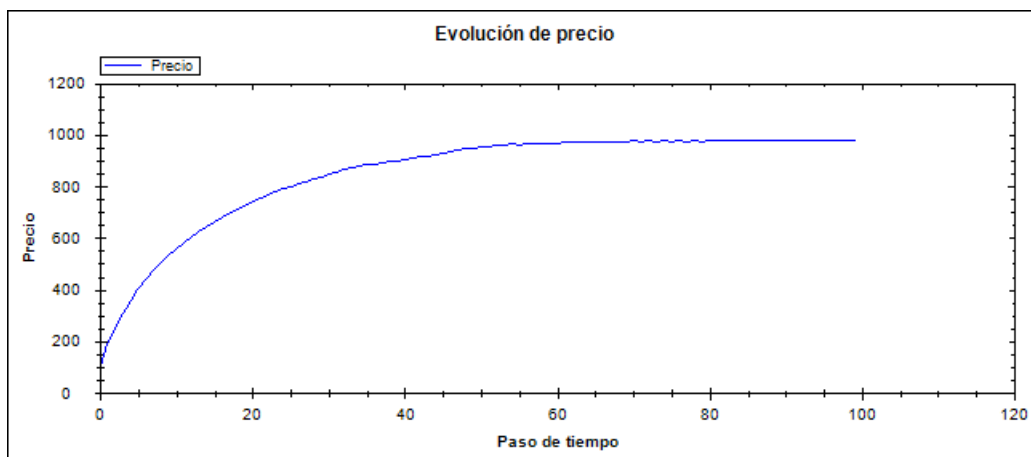


Figura 5.11. Evolución de precio con $p(1) = 100$ y $F = 1000$. Un rango mayor entre estas dos variables permite disminuir la influencia de la imitación.

Para la Figura 5.12 se realiza el mismo experimento que en la Figura 5.10, pero se aumenta la sensibilidad para reiterar la influencia del parámetro de sensibilidad en la evolución del precio, haciendo que se alcance mucho más rápido el precio al que se tiende y conservándolo al mismo tiempo.

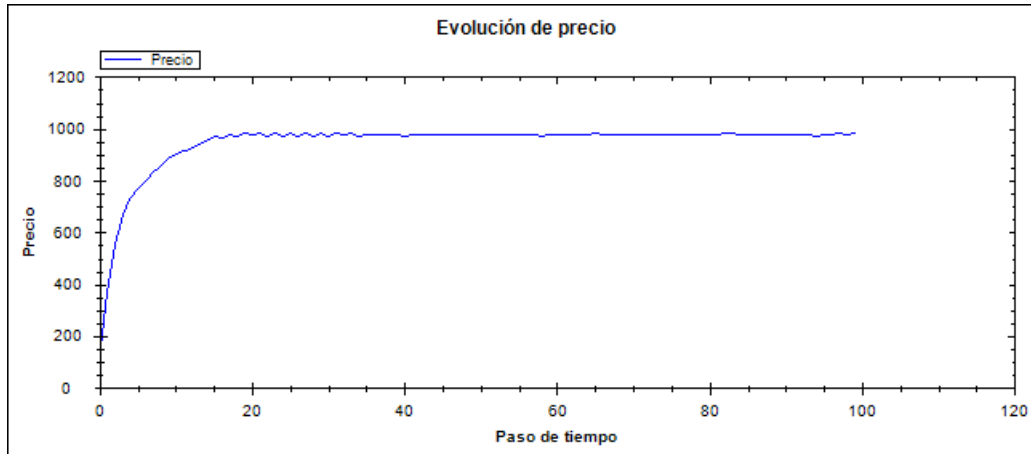


Figura 5.12. Evolución de precio con $p(1) = 100$ y $F = 1000$, pero con $cp = 3.0$. El precio fundamental se alcanza más rápido y p se mantiene con poca variación.

5.2.4. Factor Macro

El parámetro de factores macro afecta directamente la probabilidad de imitación como se describe en la Tabla 4-2. Este valor va de 0 a 1. Se pretende obtener fluctuaciones en el precio debidas a creencias en el mercado, sin variar el resto de los parámetros para observar la intensidad con la que este parámetro influye en la evolución.

Tabla 5-5. Escenario de simulación con factor macro M_f variable

Escenario de Simulación	
Parámetro	Valor
Sensibilidad a variación de precio	1.0
Probabilidad de imitación	0.1
Precio inicial	100
Precio Fundamental	300
Factor Macro	Variable
# de pasos de ejecución	100
# de fundamentalistas	1000

Las ejecuciones variando el valor de factor macro, M_f , se realizan bajo el escenario de simulación descrito en la Tabla 5-3.

En la Figura 5.13, Figura 5.14 y Figura 5.15 se puede observar cómo, a pesar de tener un valor bajo en la probabilidad de imitación, la evolución del precio se ve afectada por creencias en el mercado, i.e., Factores Macro.

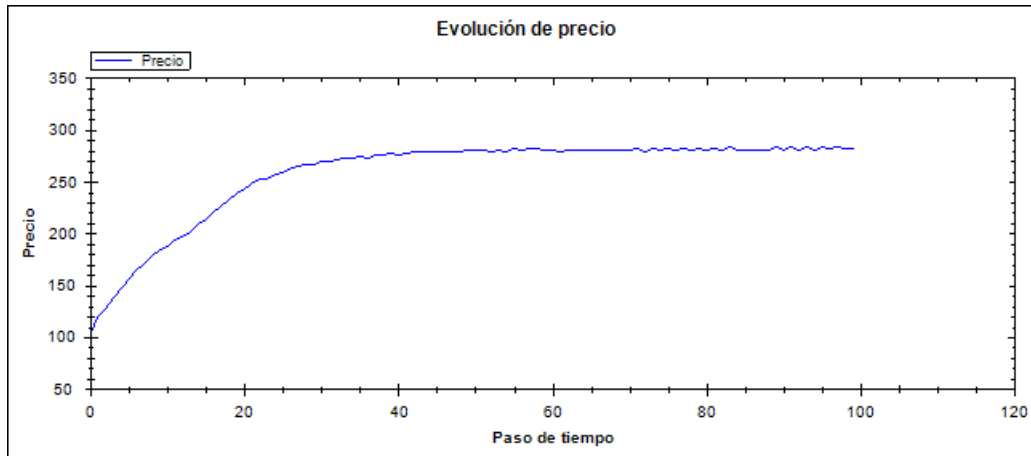


Figura 5.13. Evolución de precio con $M_f = 0.01$. La influencia externa es mínima.

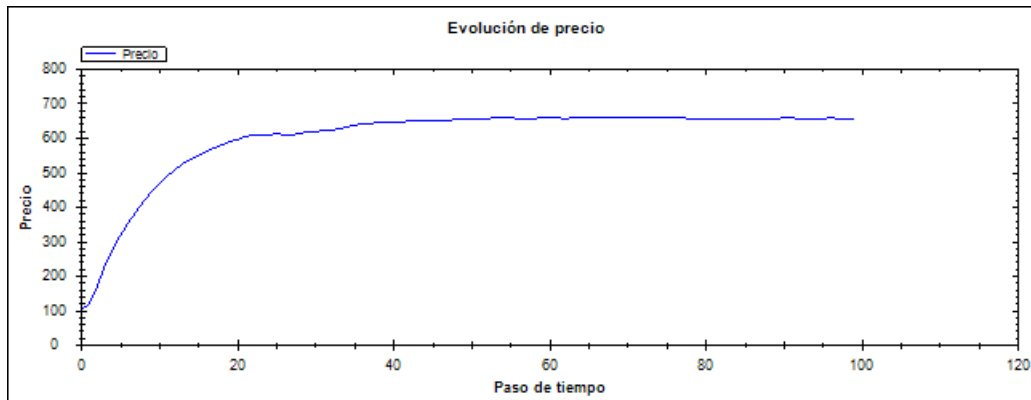


Figura 5.14. Evolución de precio con $M_f = 0.5$. El precio supera su valor fundamental (300) pero mantiene estabilidad alrededor de las 600 unidades.

Algo a tomar en cuenta también es la rapidez con la que se alcanza el valor de tendencia: para los valores de 0.1, 0.5. y 0.8 se alcanzan en valores aproximados de 30, 20 y 15, además de la gran diferencia entre estos valores de tendencia (~275, ~600 y ~800, respectivamente).

Algo a tomar en cuenta también es la rapidez con la que se alcanza el valor de tendencia: para los valores de 0.1, 0.5. y 0.8 se alcanzan en valores aproximados de 30, 20 y 15, además de la gran diferencia entre estos valores de tendencia (~ 275 , ~ 600 y ~ 800 , respectivamente).

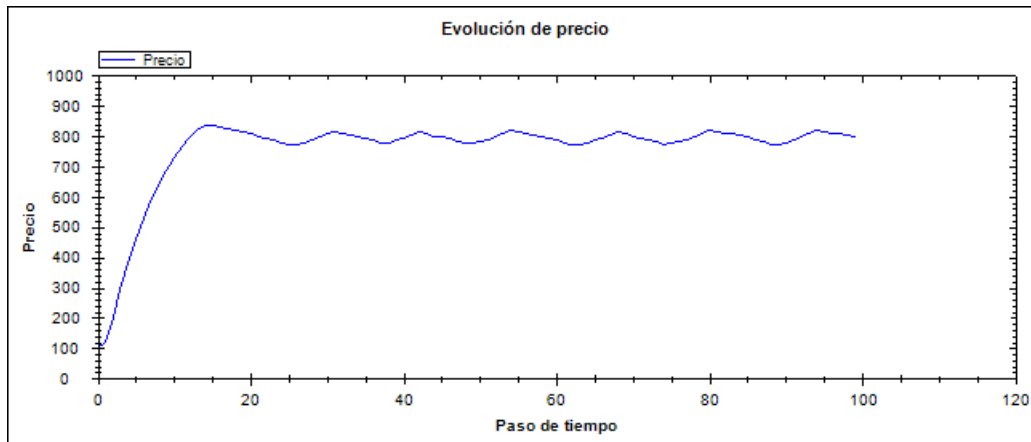


Figura 5.15. Evolución de precio con $M_f = 0.8$. El precio sigue siendo mayor a su valor fundamental y oscila alrededor de las 800 unidades.

5.2.5. Configuración inicial

Las variaciones en la configuración inicial del autómata se dan por las distintas disposiciones de los agentes fundamentalistas. Los agentes imitadores se reparten por toda la lattice llenando cualquier lugar sin ocupar por otro agente.

En la aplicación se proponen 9 configuraciones predeterminadas diferentes, cada una con la posibilidad de elegir el número deseado de agentes a distribuir. Estas se muestran en la Figura 5.19.

En este experimento se busca reflejar la dependencia de la evolución de precio ante diferentes distribuciones de los agentes fundamentalistas así como diferente cantidad de los mismos.

Las ejecuciones variando la configuración inicial, se realizan bajo el escenario de simulación descrito en la Tabla 5-2.

Tabla 5-6. Escenario de simulación con configuración inicial variable.

Escenario de Simulación	
Parámetro	Valor
Sensibilidad a variación de precio	1.0
Probabilidad de imitación	0.1
Precio inicial	100
Precio Fundamental	300
Factor Macro	0
# de pasos de ejecución	100
# de fundamentalistas	Variable

La diferencia en la cantidad de agentes fundamentalistas en las figuras Figura 5.16 y Figura 5.17 de 50% a 80% produce un mayor precio de tendencia (~300 y ~500, respectivamente), además de algunas fluctuaciones en los primeros pasos de la evolución. La mayor cantidad de fundamentalistas hace que hay muchas más operaciones de compra y venta por los mismos produciendo precios cada vez más elevados hasta alcanzar un precio estable, que también resulta ser mayor.

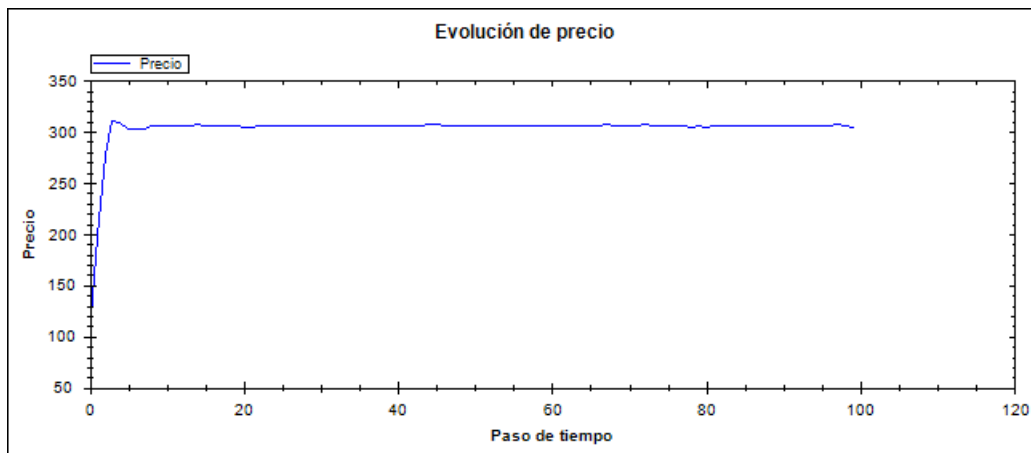


Figura 5.16. Evolución de precio con configuración inicial aleatoria y 50% de agentes fundamentalistas.
El precio oscila alrededor de las 300 unidades al estabilizarse.

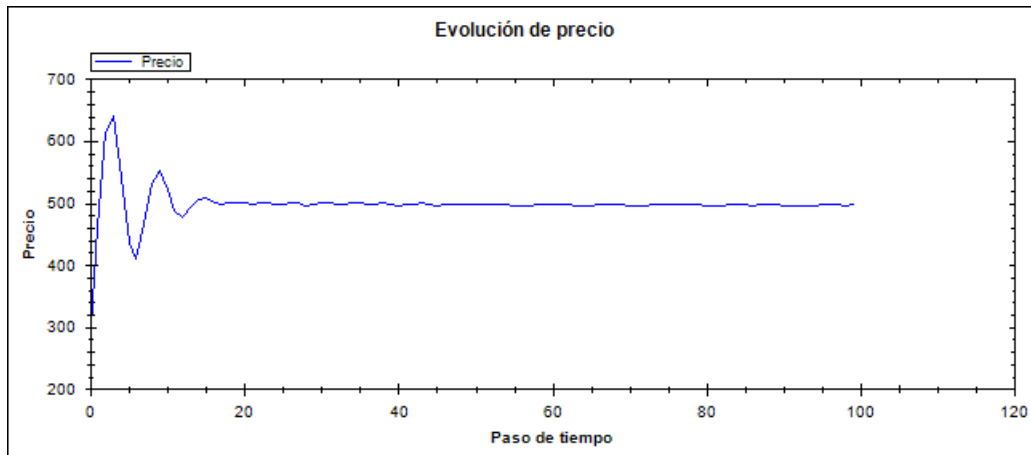


Figura 5.17. Evolución de precio con configuración inicial aleatoria y 80% de agentes fundamentalistas. Las fluctuaciones son mayores así como el valor de precio en que se mantiene el activo (~500).

Para el caso de la variación en la distribución de los agentes fundamentalistas en la Figura 5.18, el cambio no es considerable. Se observa entonces que si bien existe una relación entre las condiciones iniciales y la evolución del sistema como se señala en [29], la mayor influencia es por la cantidad y no por la distribución.

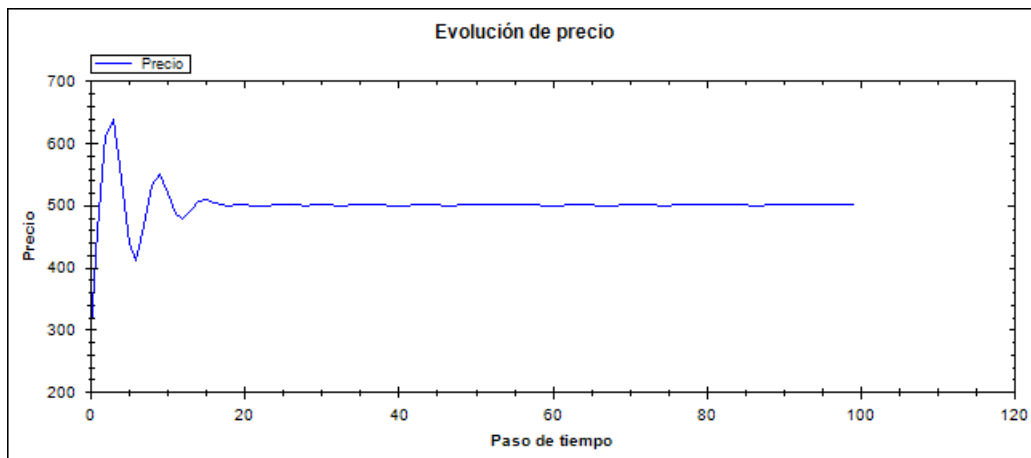


Figura 5.18. Evolución de precio con configuración inicial de líneas paralelas y 80% de agentes fundamentalistas. Se mantienen las fuertes variaciones de precio para $t < 20$ y el precio en que se estabiliza el activo.

La Figura 5.19 muestra diferentes configuraciones para las que la implementación del modelo permite inicializar la simulación. Ante estas se observa poca o nula diferencia respecto a los resultados obtenidos en este experimento.

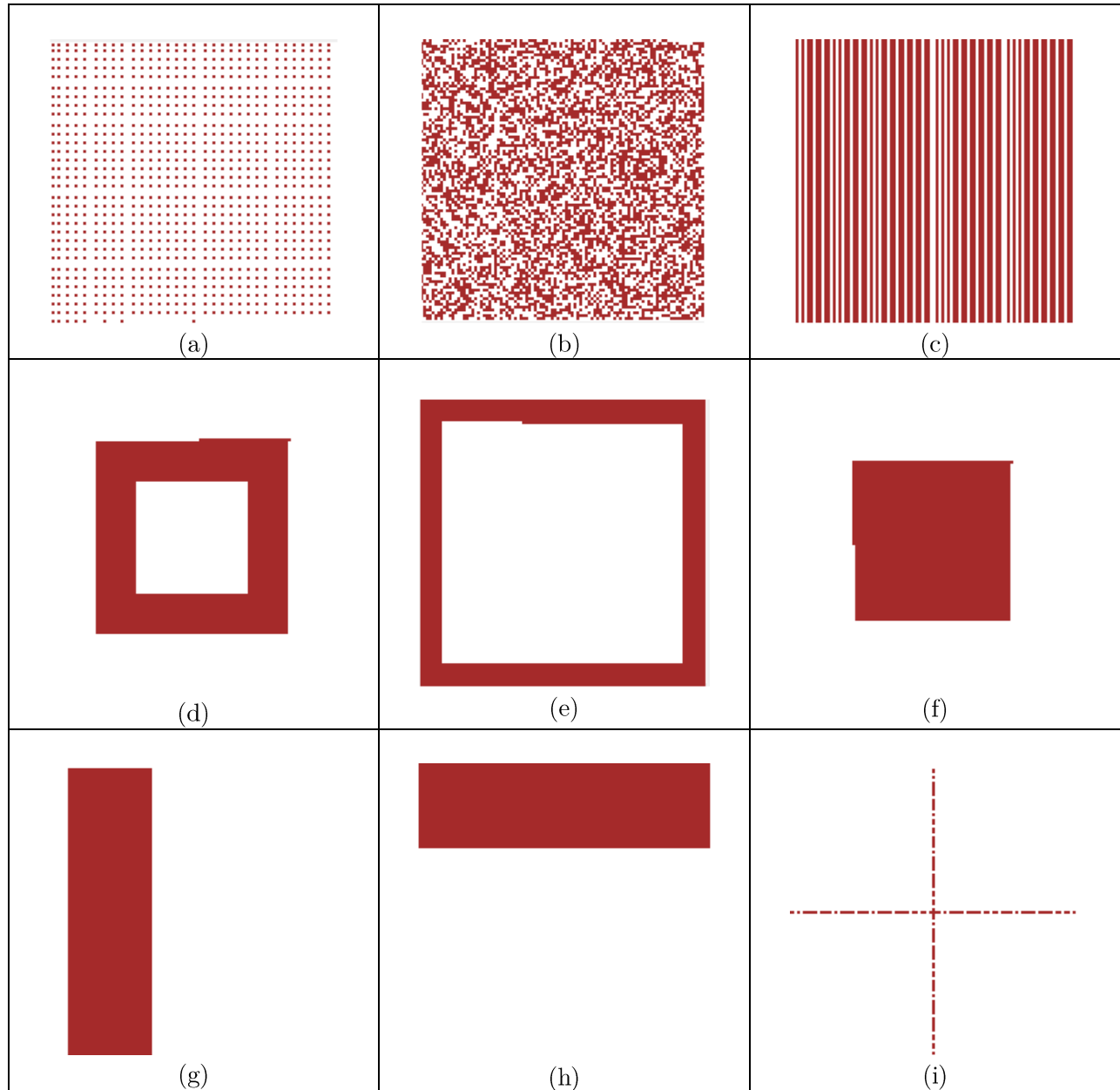


Figura 5.19. Diferentes configuraciones iniciales para la distribución de agentes fundamentalistas. (a) Uniforme, (b) Aleatoria, (c) Líneas paralelas, (d) Marco al centro, (e) Marco (f) Cuadro al centro (g) Continua Vertical, (h) Continua Horizontal, (i) Cruz.

5.3. Curtosis y Exponente de Hurst

El modelo reproduce los hechos estilizados planteados: agrupamiento de la volatilidad, mostrado en las gráficas de rendimiento; distribución del rendimiento con estelas anchas, mostrado en las gráficas de distribución del rendimiento y los valores de curtosis, y las variaciones de precio como resultado de las interacciones de los agentes de inversión. La calibración de cada parámetro para llegar a producir los hechos estilizados depende en gran medida del escenario que se desea reproducir.

Las ejecuciones se realizan variando algunos de los parámetros, como se muestra en la Tabla 5-7.

Tabla 5-7. Escenario de simulación para configuración inicial variable.

Escenario de Simulación	
Parámetro	Valor
Sensibilidad a variación de precio	Variable
Probabilidad de imitación	Variable
Precio inicial	100
Precio Fundamental	300
Factor Macro	0
# de pasos de ejecución	3000
# de fundamentalistas	Variable

La Figura 5.20 muestra la evolución de rendimiento obtenida para una configuración inicial de 100 agentes fundamentalistas y $P_i = 0.1$. El valor de curtosis obtenido indica la presencia de una distribución alejada de una Gaussiana.

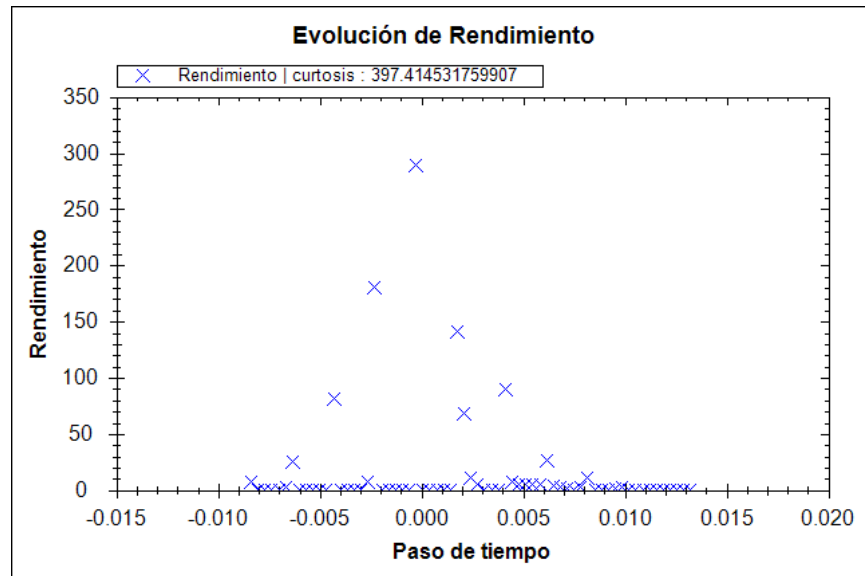


Figura 5.20. Distribución de rendimiento obtenida con $cp = 1$, $Pi = 0.1$ y 100 agentes fundamentalistas en configuración aleatoria. La curtosis obtenida es de 397.41

Para los valores de exponente de Hurst obtenidos en las figuras Figura 5.21 y Figura 5.22 se tuvieron dos ejecuciones diferentes con distintos valores de sensibilidad y pasos de evolución. Para ambos casos se obtienen valores de $H > 0.5$. Que definen también a la evolución de rendimiento como diferente de una distribución gaussiana.

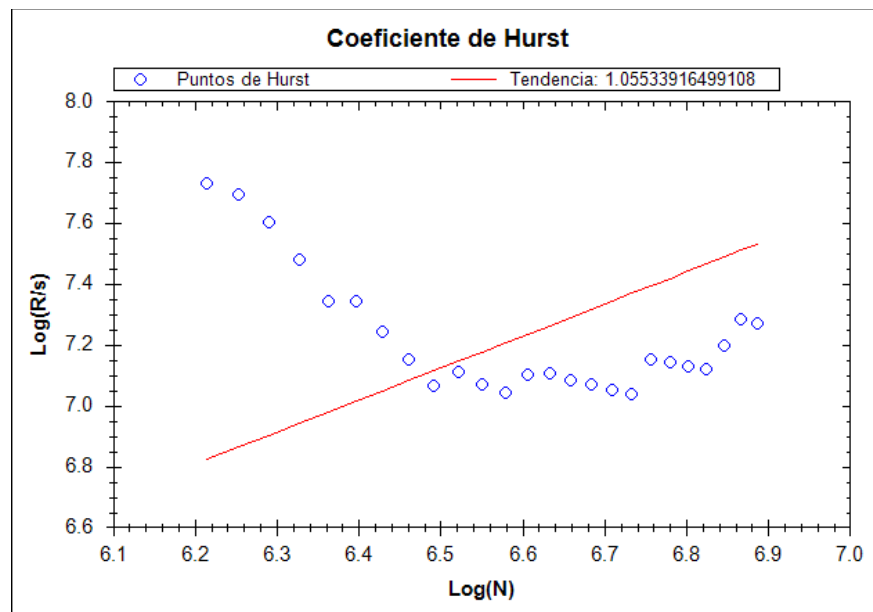


Figura 5.21. Coeficiente de Hurst de 1.055, para $cp = 1$, $Pi = 0.1$ y 100 agentes fundamentalistas en configuración aleatoria.

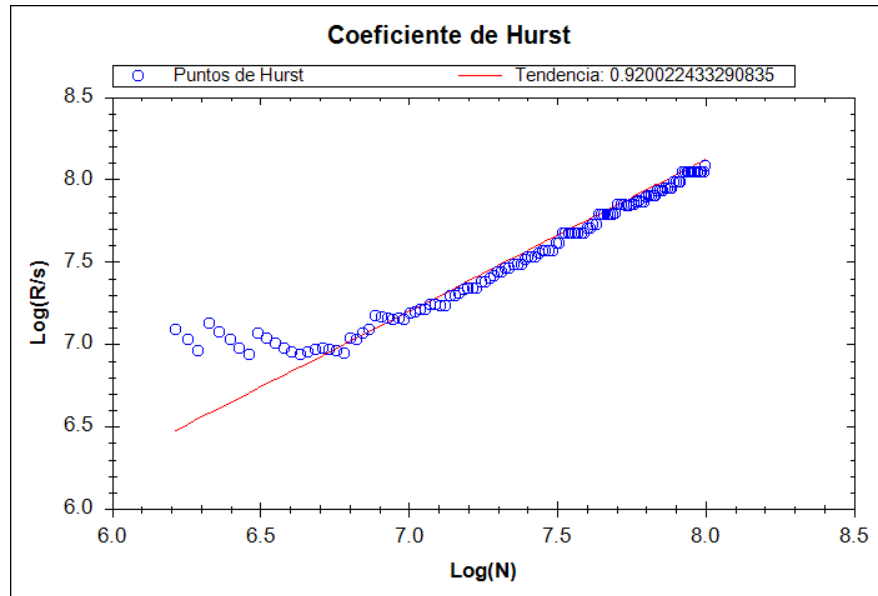


Figura 5.22. Coeficiente de Hurst de 0.92, para $c_p = 0.8$, $P_i = 0.1$ y 100 agentes fundamentalistas en configuración aleatoria. El valor de $H : .5$ sugiere cierto nivel de correlación.

Capítulo 6. Conclusiones y Trabajo Futuro.

6.1. Conclusiones

Con base en los objetivos planteados para este trabajo de tesis, se concluye lo siguiente:

- Se diseñó un modelo de Autómata Celular que reproduce aspectos de la dinámica de un mercado de valores a partir del comportamiento de los inversionistas.
- Dentro del diseño se consideraron los elementos que conducen a la generación de esta dinámica como: la oferta y demanda, la evolución del precio del activo, la sensibilidad al ajuste de precio como política macro, diferentes tipos de agentes inversionistas de acuerdo a su dinámica y posibilidades de operación, y la influencia de factores externos como factores macro.
- Se implementó el modelo propuesto en lenguaje de programación C# con el que es posible visualizar la evolución del mismo bajo diferentes condiciones iniciales y valores de parámetros, así como la evolución del precio del activo y del rendimiento, distribución de rendimiento y coeficiente de Hurst para observar correlación en el rendimiento.
- Las ejecuciones bajo diferentes valores de parámetros y condiciones iniciales permitieron verificar los resultados generados por la simulación: (i) la sensibilidad de ajuste de precio (sección 5.2.1), (ii) la influencia de factores macro (sección 5.2.4), (iii) la preferencia de inversión (sección 5.2.2) y (iv) la cantidad de agentes fundamentalistas (sección 5.2.5) como elementos que determinan la estabilidad del precio en el modelo.
- Las medidas de curtosis y exponente de Hurst implementadas para el modelo permitieron verificar la influencia del comportamiento colectivo de los agentes imitadores en la distribución del rendimiento y la correlación en la evolución del mismo. La distribución más cercana a una Gaussiana y menor valor de correlación en la evolución del rendimiento se obtiene por la disminución de agentes fundamentalistas y la consecuente independencia del resto de agentes en su operación.

6.2. Investigación Futura

Nuestro modelo diseñado incorpora diferentes aspectos del mercado para su simulación, aunque convendría agregar nuevos parámetros que se encuentran en los mercados financieros como:

- **Costos de operación**
En el modelo presentado, cada agente puede comprar o vender sin restricciones. Una característica de la operación en el mercado es el costo por cada operación que se realiza, que puede variar tanto por el tipo, cantidad, como por el hecho de haber intermediarios que cobren una comisión por sus servicios.
- **Operación sobre más de un activo**
Se presenta la simulación sobre un solo activo. Se podría agregar la opción a los agentes de elegir entre diferentes activos y operar sobre los que les convengan más. En este sentido, la mediación de precio se debería hacer tanto para cada activo como para el comportamiento de los precios de manera global.
- **Tiempos de abstención (mantenimiento del activo por un mismo agente) variables.**
En los mercados, suele haber distintos periodos de abstención en los que a un determinado agente le conviene mantener por más tiempo un activo, de acuerdo a sus capacidades. Característica que podría agregar comportamiento macro distinto.

En cuanto al sistema, es posible agregar nuevos controles para el manejo de los parámetros propuestos, así como la adición de memoria de cada ejecución, es decir, almacenamiento de la ejecución del autómata para poder reproducir resultados sin tener que ejecutar el autómata por n cantidad de pasos.

Capítulo 7. Referencias

- [1] R. Levine y S. Zervos, «Stock Markets, Banks, and Economic Growth,» *The American Economic Review*, vol. 88, nº 3, pp. 537-558, 1998.
- [2] A. Demirguc-Kunt, E. Feyen y R. Levine, «The Evolving Importance of Banks and Securities Markets,» The World Bank Development Research Group, Washington D.C., 2011.
- [3] S. Bandini y S. Manzoni, «A CA Approach to Study Complex Dynamics in Asset Markets,» *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 591 - 600, 2004.
- [4] J. Merz, «Microsimulation - A Survey of Methods and Applications for Analyzing Economic and Social Policy,» *International Journal of Forecasting*, vol. 7, nº 1, pp. 77-104, May 1991.
- [5] «Página de la International Microsimulation Association,» [En línea]. Available: <http://www.microsimulation.org>. [Último acceso: 26 02 2012].
- [6] A. Ilachinski, *Cellular Automata: a discrete universe*, USA: World Scientific, 2001.
- [7] A. Wuensche y M. Lesser, *The global dynamics of cellular automata: an atlas of basin attraction fields of one-dimensional cellular automata*, A. P. Company, Ed., USA, Massachusetts: Santa Fe Institute. *Studies in the science of complexity*, 1992.
- [8] H. V. McIntosh, *Linear Cellular Automata*, México: Universidad Autonoma de Puebla, 1987.
- [9] T. Toffoli, «Cellular automata as an alternative to (rather than an approximation of) differential equations in modeling physics,» *Physica D*, vol. 10, pp. 117-127, 1984.
- [10] A. Deutsch y S. Dormann, *Cellular Automaton Modeling of Biological Pattern Formation: Characterization, Applications, and Analysis*, USA, Massachusetts: Birkhäuser, Kluwer Academic Publishers Hingham, 2005.
- [11] «MathWorld,» Wolfram Research, Inc., 2012. [En línea]. Available: <http://mathworld.wolfram.com>. [Último acceso: 26 02 2012].
- [12] R. Mantegna y E. Stanley, *An introduction to econophysics. Correlations and complexity in finance*, UK: Cambridge University Press, 2000.
- [13] «Página del banco de México,» [En línea]. Available: <http://www.banxico.org.mx/divulgacion/sistema-financiero/sistema-financiero.html>. [Último acceso: 26 02 2012].

-
- [14] «Página de la World Federation of Exchanges,» 2012. [En línea]. Available: <http://www.world-exchanges.org/statistics>. [Último acceso: 26 02 2012].
- [15] A. Meucci, Risk and Asset Allocation, USA, NY: Springer-Verlag, 2008.
- [16] M. Schulz, Statistical physics and economics : concepts, tools, and applications, USA, NY: Springer-Verlag, 2003.
- [17] E. Banks, Financial Lexicon. A compendium of financial definitions, acronyms, and colloquialisms, USA: Palgrave, MacMillan, 2005.
- [18] A. Ortega, Introducción a las finanzas, México: Mc Graw Hill, 2004.
- [19] J.-P. Bouchaud y M. Potters, Theory of Financial Risk and Derivative Pricing, NY, USA: Cambridge University Press, 2003.
- [20] D. Rutheford, Routledge dictionary of economics, USA: Routledge, 2005.
- [21] «Página de la bolsa mexicana de valores,» [En línea]. Available: http://www.bmv.com.mx/wb3/wb/BMV/mercado_de_capitales. [Último acceso: 26 02 2012].
- [22] M. Levy, H. Levy y S. Solomon, Microscopic simulation of financial markets: from investor behavior to market phenomena, USA: Academic Press, 2000.
- [23] W. Sharpe, «Capital asset prices: a theory of market equilibrium under conditions of risk,» *The journal of finance*, vol. 19, nº 3, 1964.
- [24] W. Sharpe, «Capital Asset Prices: a theory of market equilibrium under conditions of risk,» *The journal of finance. By American Finance Association*, vol. 19, nº 3, pp. 425-442, 1964.
- [25] G. Qiu y D. Kandhai, «Understanding the complex dynamics of stock markets through cellular automata,» *Physical Review E (Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics)*, vol. 75, pp. 046116-1 - 046116-11, 2007.
- [26] M. Bartolozzi y A. Thomas, «Stochastic cellular automata model for stock market dynamics,» *Physical Review E (Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics)*, vol. 69, pp. 046112-1 - 046112-7, 2004.
- [27] R. Cont y J. Bouchaud, «An introduction to econophysics. Correlations and complexity in finance,» *Microeconomic Dynamics*, vol. 4, 2000.
- [28] P. Bak, M. Paczuski y M. Shubik, «Price variations in a stock market with many agents,» *Physica A*, vol. 246, nº 3-4, pp. 430-453, 1997.

- [29] Y. Wei y Y. Fan, «The cellular automaton model of investment behavior in the stock market,» *Physica A*, vol. 325, pp. 507 - 516, 2003.
- [30] T. Lux y M. Marchesi, «Volatility clustering in financial markets: a micro-simulation of interacting agents,» *International Journal of Theoretical and Applied Finance*, vol. 3, nº 4, pp. 675-702, 2000.
- [31] P. Gopikrishnan, «Price fluctuations and market activity,» *Physica A* , p. 299, 2001.
- [32] T. Di Matteo y e. al., «Scaling Behaviors in differently developed markets,» *Physica A*, vol. 324, pp. 183-188, 2003.
- [33] «NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods,» [En línea]. Available: <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>. [Último acceso: 26 02 2012].

Apéndice A. Detalle de implementación del modelo

El diagrama de diseño en la figura A.1 muestra los principales componentes de la implementación del modelo. A continuación se lista cada uno de ellos junto con una explicación de su operación y, en los casos en que así se considera necesario, el detalle de funcionalidad de sus métodos.

- **Automata**

Esta clase es la especialización de la clase base CA. Incluye la implementación de la función de transición en el método `FuncionEvolucion()` en la que cada uno de los elementos de la lattice (miembro de CA) actualiza su cantidad a operar en cada paso de tiempo t , i.e., implementa el nivel macro.

- **CA**

Es la base del autómata celular, e implementa las funciones de actualización a nivel individual de las celdas en la lattice como `AplicaProbabilidad()` y `NuevoEstado()`.

Se implementa además la función de actualización de precio que, a diferencia del resto de funciones, se llama por separado al tratarse de una función que afecta el estado del AC y no sólo las celdas de la lattice.

Contiene además los parámetros que rigen la configuración del modelo, y que son manejados a su vez por el módulo de `ConfigInicial`.

Sus métodos principales se describen a continuación:

`AplicaProbabilidad()`

Aplica la tabla de probabilidades de preferencia de inversión que se describe en la sección 4.6 del trabajo de tesis

`ActualizaPrecio()`

Aplica la actualización de precio que se conoce por los agentes en la lattice de acuerdo a la ley de oferta y demanda, como se describe en la sección 4.7 del trabajo de tesis.

`NuevoEstado()`

Sirve de orquestador dentro de esta clase para afectar a cada una de las celdas de la lattice.

`Getqt(x, y)`

Obtiene la cantidad que un agente va a operar en el siguiente paso de tiempo de acuerdo al tipo de que se trate y su vecindario si aplica.

- **ConfigInicial**

Se encarga del manejo de los parámetros de inicio o continuación de una ejecución. Maneja también la aplicación de una configuración de agentes fundamentalistas en la lattice mediante `frmConfigInicial`. Sus propiedades contienen a las última cantidad de agentes fundamentalistas manejada en la lattice así como su última configuración (`UltimaCantidad` y `UltimaConfiguracion`, respectivamente), de modo que siempre estén disponibles para una nueva ejecución.

Entre sus métodos principales están:

`GeneraConfig(TipoConf)`

Crea una configuración en la lattice del tipo `TipoConf` (que se trata de un enum) solicitado.

`LlenaLattice`

Llena la lattice con agentes imitadores. Funciona como base para luego incluir la configuración deseada de Fundamentalistas.

`ReparteUniforme`

Reparte de manera uniforme una cantidad de agentes dentro de un rango especificado en la lattice.

- **frmConfigInicial**

Sirve para la elección de la configuración inicial y cantidad de agentes fundamentalistas repartidos en la lattice. Muestra las diferentes opciones que se presentan en la Figura 5.19 del trabajo de tesis.

- **frmPrincipal**

Es la ventana principal de la implementación en donde se muestra la lattice, el menú de configuración inicial y acceso a las gráficas, así como controles para el cambio de parámetros y control de la ejecución.

El dibujado de la lattice se maneja en un objeto de tipo `Bitmap` que se llena de acuerdo al valor de un arreglo bidimensional de objetos `Traders` que representan la lattice propiamente. Es en esta clase donde se encuentra determinado el tamaño de la lattice por lado (siempre cuadrada), y la propiedad privada `_delayPinta` que, si es mayor a cero, indica el número de milisegundos de retraso entre cada actualización de la lattice para proporcionar una evolución más lenta. La propiedad `turbo` que se puede alterar por el usuario, permite una ejecución más rápida al eliminar el refresco de la imagen de la lattice a cada paso de tiempo. Finalmente, la propiedad `_vueltasMax` hace que la ejecución se detenga en un determinado número de pasos, pero se toma sólo al inicio de la ejecución como un parámetro a `ConfigInicial`, por lo que no se toma en cuenta un cambio durante la ejecución en una pausa sino justo antes de la misma.

- **Graph**

Es la base para la graficación de las series que se muestran durante y después de las ejecuciones. Contiene los métodos base para aumentar o disminuir la vista de la gráfica, guardar la imagen y realizar el reescalamiento conforme el número de puntos disponibles crece más allá de las fronteras visibles.

- **GraphBasico**

Se utiliza para graficar la evolución de precio y rendimiento, que se tratan de cálculos que se hacen conforme se realiza la ejecución del modelo. La llamada a estas gráficas se hace desde frmPrincipal desde donde se añade uno a uno los puntos que la componen, y su método de reescalamiento maneja su correcta visualización. A diferencia de las otras gráficas que dependen de cierto número de puntos antes de poder ejecutarse.

- **GraphHurst**

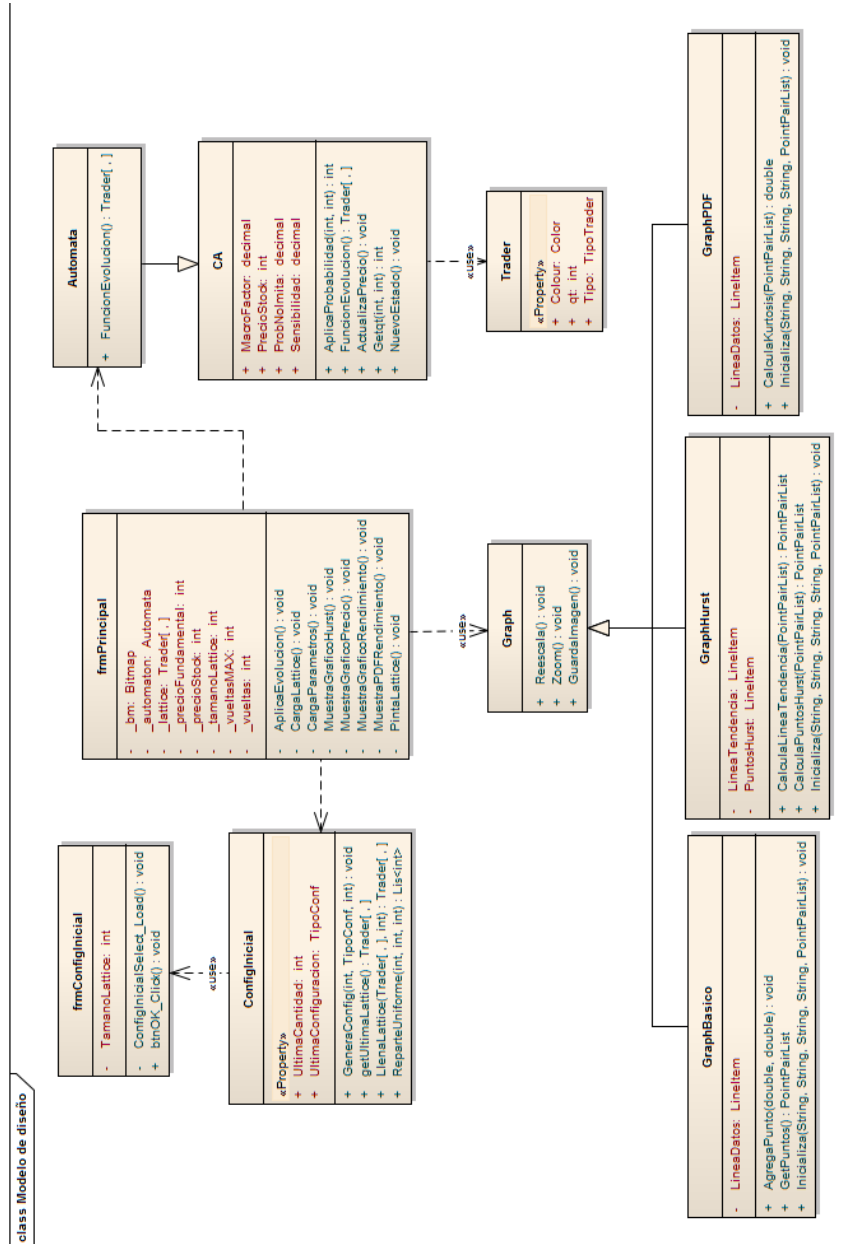
Muestra los puntos de Hurst juntos con su línea de tendencia y los valores de curtosis. Su llamada se realiza una vez se ha ejecutado el modelo por al menos 300 pasos debido a la dependencia que existe en el cálculo por reescalamiento (se comienza a partir de 300 y se añaden 10 en cada reescalamiento).

- **GraphPDF**

Muestra un histograma del rendimiento, por lo que también depende de que se haya ejecutado el modelo durante algún tiempo. Aunque no existe restricción en cuanto al número de pasos mínimo como para GraphHurst, un número pequeño muestra una gráfica con puntos muy dispersos.

- **Trader**

Es la clase que maneja a las agentes, sus tipos, la cantidad que operan a cada paso de tiempo y el color con que se representan en la lattice. Conforman la lattice y se llaman por distintas funciones en la aplicación.



A.1Diseño general de la aplicación.

Apéndice B. Manual de usuario

En este apartado se pretende dar al lector una guía de operación de la aplicación. Se describen cada uno de los componentes, su uso y retroalimentación esperada.

Ejecución de la aplicación.

Dentro de la carpeta donde se encuentra la aplicación, ejecutar CASMM.exe (Figura B.1). Se mostrará una ventana como la de la Figura B.2

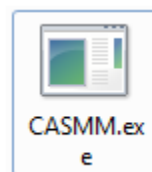


Figura B.1 Icono de la aplicación CASMM

Interfaz Principal

Lo primero que se muestra al usuario es la Interfaz Principal (Figura B.2), a partir de la cual puede elegir los valores de los parámetros de los modelo, su configuración inicial y/o comenzar la ejecución de inmediato.

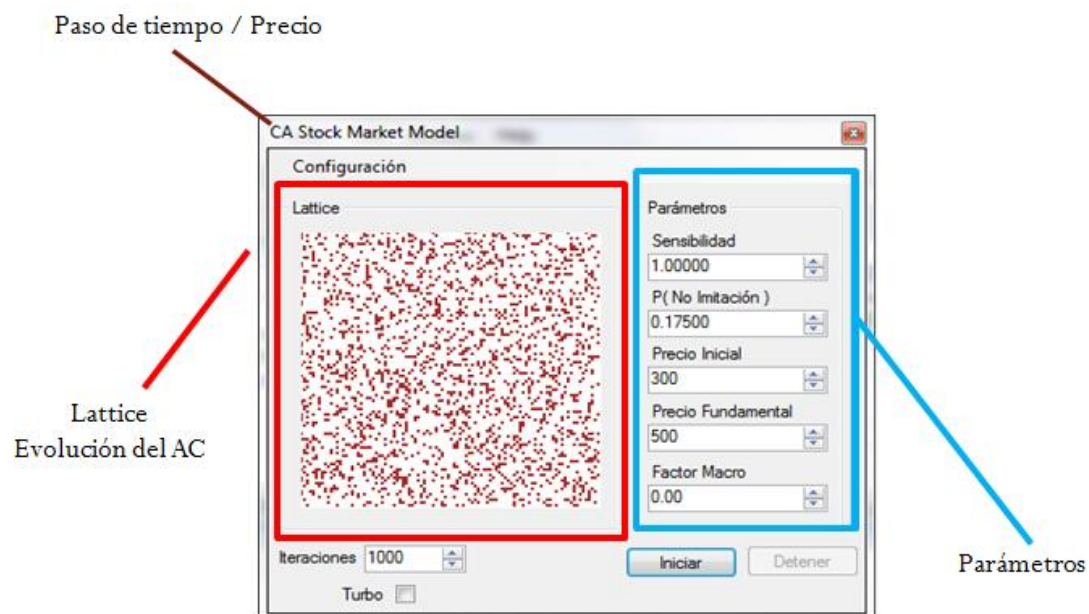


Figura B.2 Interfaz principal. Es lo primero que se muestra al usuario

Controles

1. Botón Iniciar

Ejecuta el modelo de acuerdo a los parámetros elegidos al momento. En cuanto se presiona, cambia al botón Pausa y el botón Detener se activa, la lattice se muestra refrescándose a cada paso de tiempo si el valor de turbo no está seleccionado, y se muestra el valor del precio a cada paso de tiempo en la barra de título junto con las gráficas de evolución de precio rendimiento. Ver Figura B.3

2. Botón Detener

Se encuentra desactivado hasta que se haya presionado el botón Iniciar. Permite detener la simulación. Si la ejecución cubrió suficientes puntos, se muestran las gráficas de Hurst y Distribución de rendimiento. Al presionarlo, el botón cambia a Reiniciar. Ver Figura B.3, Figura B.4 y Figura B.5.

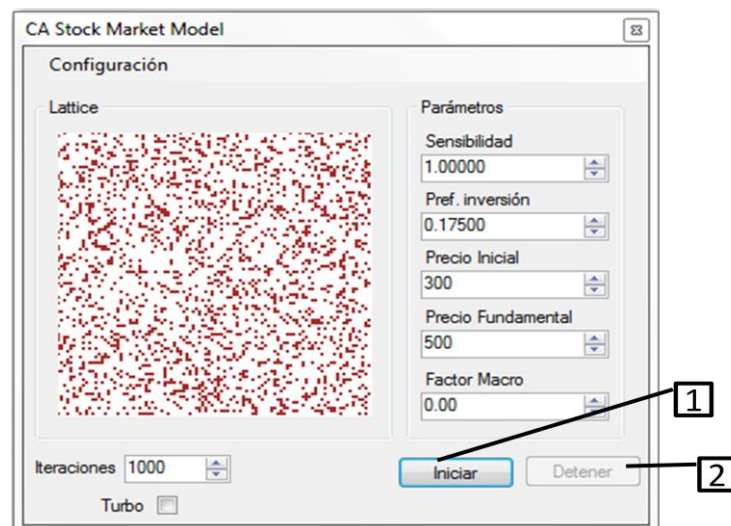


Figura B.3 Botón Iniciar y Botón Detener desactivado.

3. Botón Pausa

Aparece durante una ejecución y permite pausar la simulación. En cuanto se pulsa, cambia al botón Continuar. Ver Figura B.4

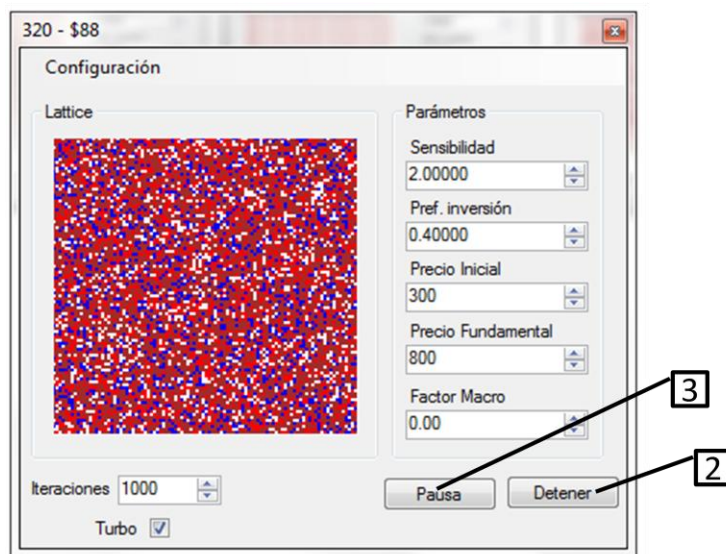


Figura B.4 Botón Pausa y Detener (activado)

4. Botón Continuar

Permite continuar con una ejecución que se ha pausado.

5. Botón Reiniciar

Una vez detenida la simulación, permite ejecutar de nuevo la simulación con los mismos parámetros desde el paso de tiempo $t=0$. Ver Figura B.5

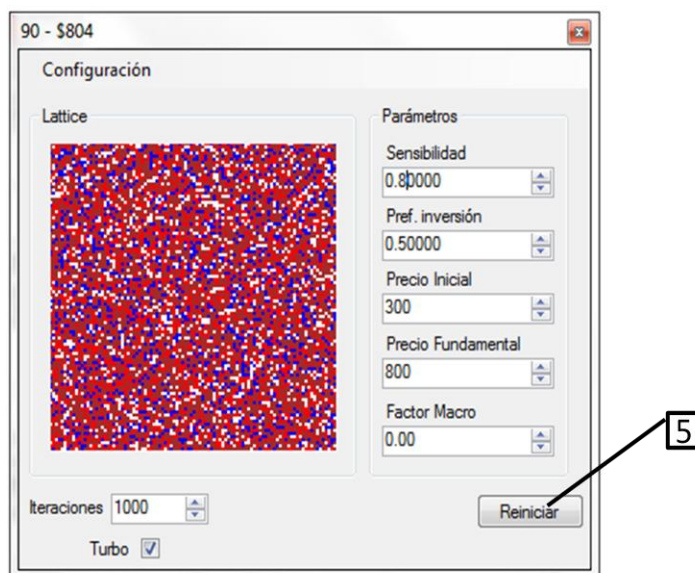


Figura B.5 Botón Reiniciar

6. Iteraciones

Este valor permite establecer el número de pasos de tiempo para la simulación. Su valor mínimo es 10 y sólo se puede establecer antes de cada ejecución ya que durante la misma no es tomado en cuenta, a menos que se pause. Ver Figura B.6

7. Turbo

Si se elige este modo, la lattice que se muestra en la ventana no se refresca, lo que incrementa la rapidez de la ejecución. Ver Figura B.6

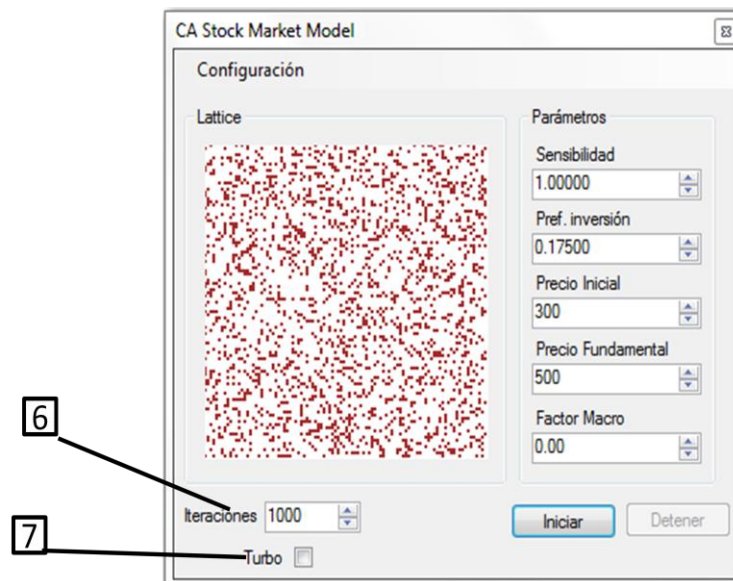


Figura B.6 Controles de número de iteraciones y modo turbo (desactivado)

8. Parámetros

Los controles que se muestran del lado derecho de la ventana corresponden a los parámetros del modelo. Se describe cada uno a continuación y se muestran en la Figura B.7.

a. Sensibilidad

El parámetro de sensibilidad forma parte de la función de actualización de precio, como se describe en la sección 4.5 del trabajo de tesis. Este parámetro define cuán sensible es el sistema a cambios de precio para luego ajustarse de acuerdo a la cantidad de operaciones de compra/venta en el paso de tiempo anterior. Al manipularlo se puede observar la

intensidad con la que se dan los cambios de precio en cada paso de tiempo.

b. Pref. de inversión

La preferencia de inversión está definida en la sección 4.6 del trabajo de tesis. Permite definir la probabilidad que tiene cada agente imitador de imitar (tomar en cuenta que el modelo permite valores entre 0 y 1, por lo que en estos límites el comportamiento es de nula o total imitación, respectivamente)

c. Precio inicial

Es el precio del activo en el que se inicia la simulación. Puede contener valores entre 1 y 10000.

d. Precio fundamental

Es el precio que conocen los agentes fundamentalistas y sus valores pueden estar entre 1 y 10000. El valor de este parámetro no depende de aquel del Precio inicial, y puede ser tanto menor como mayor al mismo.

e. Factores Macro

El valor de factor macro oscila entre 0 y 1, con 1 siendo el límite de confianza que tienen los inversionistas en que el precio del activo suba y 0 en que no haya ninguna influencia sobre sus decisiones.

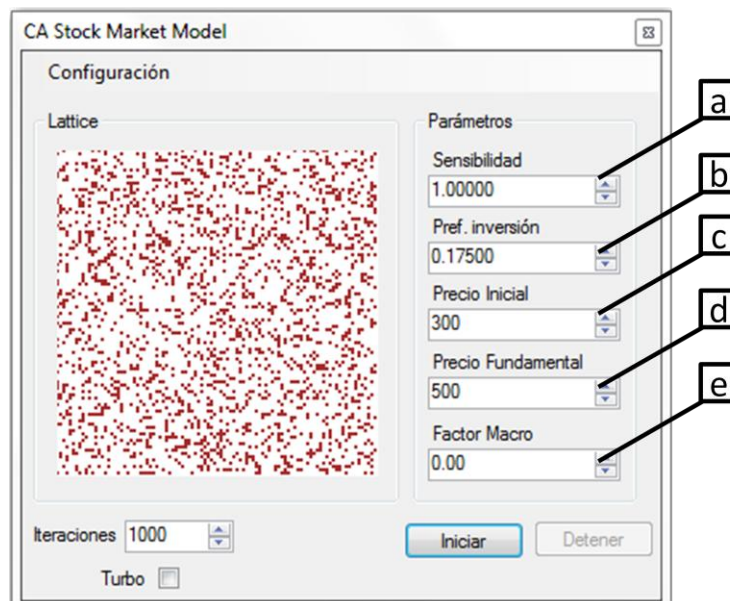


Figura B.7 Controles para los parámetros del modelo.

Menú de configuración inicial

El menú de configuración inicial (Figura B.8) lleva a la ventana de selección de configuración (Figura B.9). En esta ventana se muestran dos controles, uno para seleccionar el tipo de configuración deseada y otro para elegir la cantidad o probabilidad de agentes fundamentalistas para la dicha configuración.

Una vez selecciona, la configuración se aplica en la lattice al presionar el botón Aplicar, o se cancela y se regresa a la ventana principal sin cambios con el botón Cancelar.

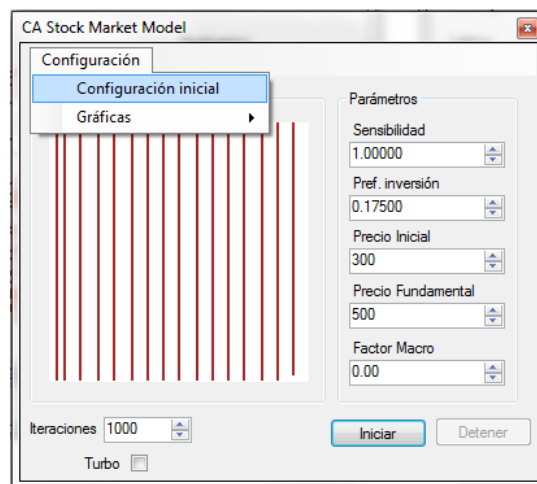


Figura B.8 Menú de configuración inicial

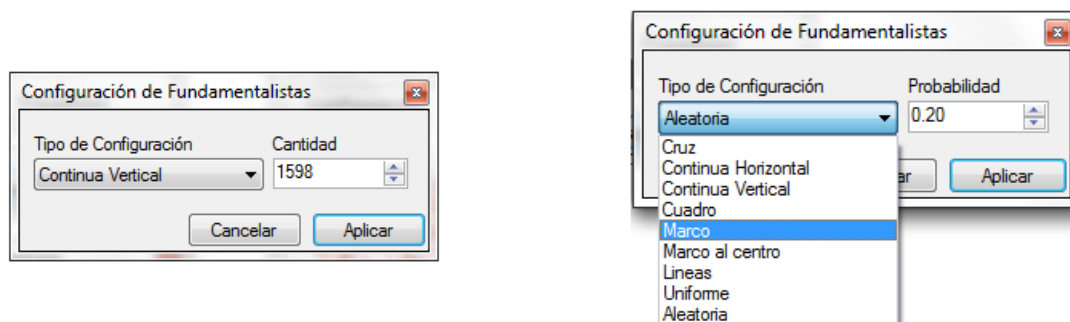


Figura B.9 Ventana de selección de configuración inicial y opciones de configuración.

El control de cantidad puede variar si se selecciona una configuración aleatoria, ya que para esto lo que se solicita es una probabilidad. Ver Figura B.10

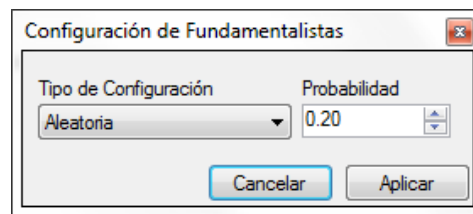


Figura B.10 Opción de cantidad en la configuración continua vertical.

Gráficas

En el menú de configuración también se muestra la opción de gráficas, como puede observarse en la Figura B.8. Dentro de este menú se tienen 4 opciones que se corresponden con las gráficas que es posible mostrar: Rendimiento (Figura B.11 a), Precio (Figura B.11 b), Distribución (Figura B.11 c) y Hurst (Figura B.11 d).

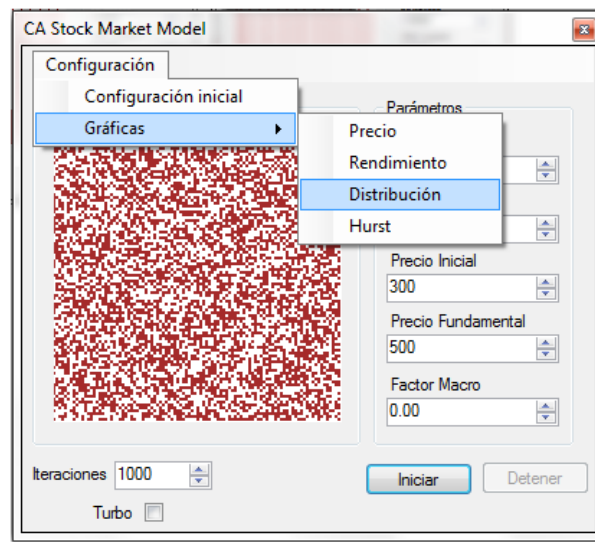
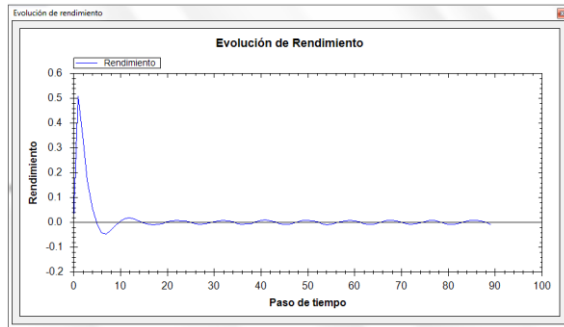
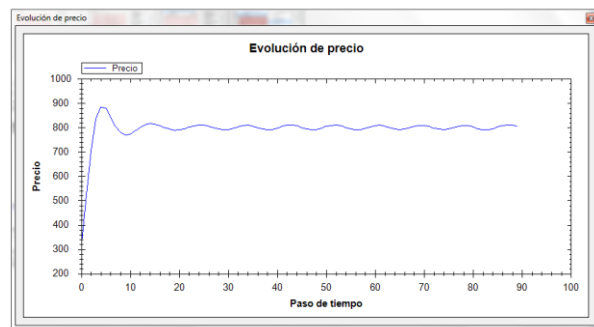


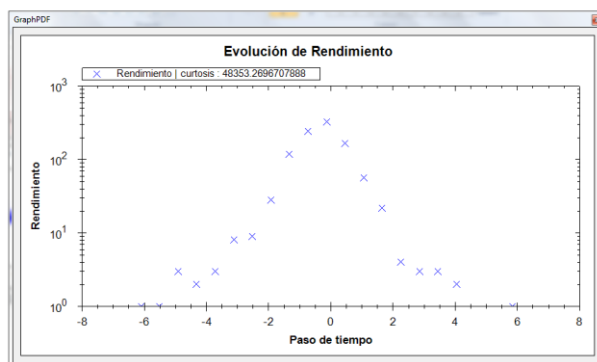
Figura B.11 Opciones de gráficas dentro del menú de Configuración.



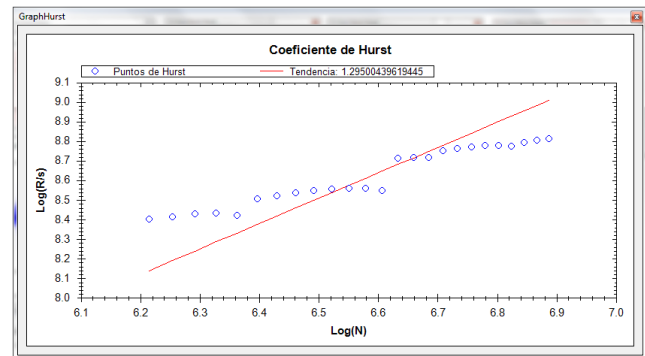
(a)



(b)



(c)



(d)

B.12 Opciones de gráficas en la aplicación: (a) evolución de rendimiento; (b) evolución de precio; (c) Distribución de rendimiento; y (d) Puntos de Hurst.

Las primeras dos se muestran junto con la ejecución del modelo, pero se pueden volver a mostrar con estas opciones en caso de que se hayan cerrado. Las gráficas de Distribución y Hurst dependen de una ejecución previa del modelo, y en caso de que no haya suficientes datos para mostrarse, se desplegará un mensaje como el de la Figura B.13

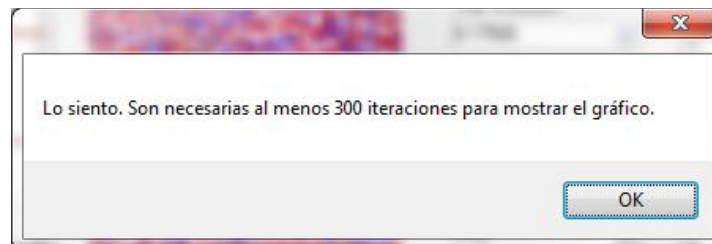


Figura B.13 Mensaje de error al solicitar las gráficas de Distribución de Rendimiento y Hurst después de una ejecución con pocos pasos.