



Universidad de Buenos Aires
Facultad de Ciencias Económicas
Biblioteca "Alfredo L. Palacios"



La gestión del riesgo en sistemas complejos. el caso del mercado bursátil y la microeconomía Latinoamericana durante la crisis internacional 2007 a 2009

Thomasz, Esteban Otto

2009

Cita APA:

Thomasz, E. (2009). La gestión del riesgo en sistemas complejos, el caso del mercado bursátil y la microeconomía Latinoamericana durante la crisis internacional 2007 a 2009. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Económicas

Este documento forma parte de la colección de tesis doctorales de la Biblioteca Central "Alfredo L. Palacios". Su utilización debe ser acompañada por la cita bibliográfica con reconocimiento de la fuente.

Fuente: Biblioteca Digital de la Facultad de Ciencias Económicas - Universidad de Buenos Aires



Universidad de Buenos Aires
Facultad de Ciencias Económicas



Doctorado en Ciencias Económicas

CATALOGUE

Tesis

Esteban Otto THOMASZ
Resolución C.D. N° 3260/08

La Gestión del Riesgo en Sistemas Complejos

El caso del mercado bursátil y la macroeconomía latinoamericana
durante la crisis internacional 2007-2009

Doctorando: Lic. Esteban Otto THOMASZ

Director: Dra. María Teresa CASPARRI

CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS.....	6
RESUMEN.....	7
ASPECTOS FORMALES Y METODOLÓGICOS.....	9
DEFINICIÓN DEL TEMA.....	9
FORMULACIÓN DEL PROBLEMA Y DE LA HIPÓTESIS.....	9
ESTRUCTURA DEL TRABAJO.....	11
PRIMERA PARTE.....	14
1. INTRODUCCIÓN.....	14
1.1. Enfoque Tradicional.....	15
1.2. Tradición Científica.....	16
1.3. El Peso de la Herencia.....	16
1.4. El traspaso a la ciencia económica.....	18
1.5. Nuevas Rutas.....	19
1.6. Paradigmas.....	21
SEGUNDA PARTE.....	23
2. SISTEMAS COMPLEJOS.....	23
2.1. Teoría de La Complejidad.....	23
2.1.1. El Concepto de Complejidad.....	24
2.1.2. Sistemas Complejos.....	25
2.1.3. Los modelos de agente.....	27
2.1.3.1. Un ejemplo preliminar: La ovación de pie.....	28
2.1.3.1.1. Camino hacia un modelo complejo.....	29
2.1.3.2. Agentes heterogéneos.....	30
2.2. Dinámica Caótica.....	33
2.2.1. Conceptos principales.....	33
2.2.2. Implicancias para la modelización en economía.....	35
2.2.3. Síntesis.....	38
TERCERA PARTE.....	40
3. ENFOQUE COMPLEJO EN MODELOS ECONÓMICOS.....	40
3.1. La dinámica caótica en los modelos clásicos.....	40
3.1.1. Caos en modelos económicos.....	42
3.1.1.1. Rational Choice.....	42
3.1.1.2. Modelos de Crecimiento: Solow.....	42
3.1.1.3. Modelos de crecimiento: Agente representativo.....	43
3.1.1.4. Mitad de camino.....	44
3.2. Sistemas complejos adaptativos en economía.....	45

3.2.1.	Síntesis	50
3.2.2.	Modelos de Agente en Economía	51
3.2.2.1.	Modelo de crecimiento con agentes heterogéneos	51
3.2.2.1.1.	Simulación	54
3.2.2.2.	Modelo de Crecimiento con Market Sentiment	58
3.2.2.2.1.	Conclusiones	60
3.2.3.	Síntesis	61
3.3.	Evolución de la Teoría Financiera	62
3.3.1.	Modelización clásica y sus críticas	62
3.3.2.	La Teoría de Precios Especulativos	64
3.3.3.	Inconsistencias del Modelo de Wiener	65
3.3.4.	Otras Críticas al modelo clásico	67
3.3.5.	Síntesis	69
3.3.6.	Modelos y Simulaciones	72
3.3.6.1.	Agentes en Interacción en Mercado de Capitales I	72
3.3.6.1.1.	Simulaciones	75
3.3.6.1.2.	Conclusiones	77
3.3.6.2.	Agentes en Interacción en Mercado de Capitales II	78
3.3.6.3.	Modelo de Transmisión de Información	79
3.3.6.3.1.	Conclusiones	81
3.3.6.4.	Síntesis de los resultados	81
3.3.7.	Aplicación del enfoque complejo a través de los ABM	82
3.3.7.1.	Lo nuevo y lo viejo	82
3.3.7.2.	La dinámica de los fenómenos observados	83
3.3.7.3.	La validez de la microfundamentación alternativa	84
3.3.7.4.	La construcción del modelo y el enfoque analítico	85
3.4.	Cierre de la Sección Tercera	86
CUARTA PARTE		88
4.	CASOS DE ESTUDIO	88
4.1.	CASO I: La Dinámica del Mercado de Capitales	88
4.1.1.	El mercado Mundial	90
4.1.1.1.	Período 2003–2010	90
4.1.1.2.	Comparación: contexto previo y crisis	93
4.1.2.	Mercados Desarrollados y Emergentes	96
4.1.2.1.	Período 2003–2010	96
4.1.2.2.	La situación en el período pre-crisis	106
4.1.2.3.	Período de crisis	110
4.1.2.4.	Comparación: contexto previo y crisis	113
4.1.2.5.	Indicadores Evolutivos	115
4.1.3.	La estructura del mercado de capitales	119
4.1.4.	Modelo de Simulación	122
4.2.	CASO II: Las economías latinoamericanas	133
4.2.1.	Panorama Internacional	133

4.2.2.	La Situación de América Latina	134
4.2.2.1.	Las condiciones iniciales del bloque latinoamericano	135
4.2.2.2.	Los Canales De Impacto De La Crisis	137
4.2.2.2.1.	Canal Real.....	137
4.2.2.2.2.	Canal Financiero.....	140
4.2.2.3.	Implementación de Políticas en Tiempos de Crisis.....	142
4.2.2.3.1.	Política Fiscal y Tributaria.....	142
4.2.2.3.2.	Sesgo Procíclico	144
4.2.2.3.3.	Horizonte.....	145
4.2.2.4.	Propagación de <i>shocks</i>	145
4.2.3.	El modelo analítico.....	149
4.2.3.1.	Selección del modelo.....	151
4.2.3.2.	Alcances y limitaciones de la visión analítica propuesta.....	152
4.2.4.	El Caso de la Economía Argentina.....	155
4.2.5.	Tópicos del marco propuesto.....	163
4.2.5.1.	Locus del riesgo	166
4.2.5.2.	Emergente endógeno y emergente reactivo	166
4.2.5.3.	Aplicaciones de la teoría del caos	167
4.2.5.4.	Microfundamentación	168
4.2.5.5.	Crisis y cambio estructural: visión analítica.....	173
4.2.5.6.	Síntesis.....	177

QUINTA PARTE..... 178

5. GESTIÓN DEL RIESGO..... 178

5.1. El sistema tradicional de gestión del riesgo..... 178

5.1.1. Diagnóstico

5.1.2. Acciones bajo escenarios complejos..... 185

5.2. La gestión de la complejidad como estrategia..... 186

6. SÍNTESIS Y CONCLUSIONES..... 190

6.1. Síntesis

6.2. Conclusiones

7. BIBLIOGRAFÍA..... 194

8. ANEXOS..... 200

8.1. Anexo 1: Dinámica Caótica..... 200

8.1.1. Flujos

8.1.2. Propiedades de las Trayectorias..... 201

8.1.2.1. Tipos de Trayectorias..... 201

8.1.3. El Estudio de Lorenz

8.1.4. La dinámica caótica en pocas palabras

8.1.5. Dinámica Caótica: Una definición formal

8.1.6. Dinámica caótica en un mapa unidimensional

8.1.7. La perturbabilidad de los senderos estables e inestables..... 216

8.2.	Anexo 2: Sistemas y Atractores	221
8.2.1.	Sistemas deterministas y no deterministas	221
8.2.2.	Sistemas conservativos y sistemas disipativos	222
8.2.3.	Atractores.....	223
8.3.	Anexo 3: Indicador Sintético de Riesgo Argentino	229
	Metodología	230

AGRADECIMIENTOS

(en orden cronológico)

A Juan Ramón Garnica Hervas, por haber motivado mi interés en la investigación creativa

A María Teresa Casparri, por haberme guiado de manera ejemplar a lo largo de este trabajo, y poner a mi disposición todos los medios para concluirlo

A Javier Ignacio García Fronti, por haberme acompañado en la fase final de esta investigación

Dedico todo el empeño puesto a largo de estos años al recuerdo de mi padre

Buenos Aires, 21 de junio de 2012

RESUMEN

La motivación de este trabajo surge a partir de los repetidos casos de estallidos de crisis sistémicas en el grupo de países latinoamericanos a lo largo de la historia, combinado con la falta de marcos teóricos para su análisis e incorporación de tales fenómenos en los sistemas de gestión del riesgo. En tanto, el estallido de la crisis *subprime* generó una motivación adicional, dando mayores argumentos a la búsqueda de teorías de la crisis en vistas de la implosión de un caso paradigmático al interior del mercado que era percibido como arquetipo y referencia de la economía mundial.

En este sentido, ante diversos escenarios de crisis sistémicas de los últimos años, se ensaya la posibilidad de aplicar elementos de la dinámica compleja (Day, 1994; Chian, 2007) al análisis del riesgo macroeconómico y financiero.

En referencia al marco teórico, se encuentra que una forma de aplicar la dinámica compleja al análisis económico es a través del concepto de modelo complejo aplicado a la economía de Holland (1999). Entre otras cuestiones, esto implica levantar el supuesto de agente representativo por un lado y el de expectativas racionales por otro. A nivel operativo, se plantea que una de las herramientas para modelizar un sistema económico desde la perspectiva especificada, es a través del enfoque generativo (Epstein, 2006), específicamente mediante modelos de agente (Testefiason, 2006).

En cuanto al análisis empírico, se han desarrollado dos casos de estudio:

- Sobre bases estadísticas, se realiza un relevamiento del mercado bursátil mundial en el marco de la crisis *subprime*, mostrando que los métodos estocásticos tradicionales de estimación del riesgo resultan obsoletos en el marco de las crisis sistémicas. En este sentido, se identifica a la dinámica emergente como uno de los mayores riesgos dentro de un complejo. Se mostrará sobre bases teóricas que un modelo generativo puede, a través de una estructura muy simple, ostentar efectos emergentes, generando una distribución de rendimientos semejante a los casos empíricos presentados.
- A nivel exploratorio, se analiza el impacto de la crisis internacional en el bloque de economías latinoamericanas. Se observa que los *shocks* exógenos tienen un efecto propagador importante, vinculado a debilidades históricas de la estructura macroeconómica. Frente a esto, se ensaya la posibilidad de aplicar el concepto de amplificación de *shocks* (caos) como modelo analítico.

El planteo fundamental del trabajo consiste en la interpretación de la dinámica emergente como fuente de riesgo sistémico, y la aplicación de la dinámica compleja como meta-modelo, quedado como hipótesis derivada la factibilidad de la existencia de dinámica caótica en ciertos contextos de crisis.

Además, se propone la incorporación de las simulaciones y conceptos planteados dentro de un esquema de gestión del riesgo, ubicando su instrumentación operativa en los análisis de *stress*.

ASPECTOS FORMALES Y METODOLÓGICOS

DEFINICIÓN DEL TEMA

Este trabajo se centrará en el estudio del riesgo desde la óptica de los sistemas complejos, aplicado al análisis macroeconómico de países emergentes y al mercado bursátil mundial.

En el ámbito financiero, se abordará la temática de la estimación del riesgo de los activos, profundizando el entendimiento de las "lógicas" que gobiernan la dinámica de los mercados. En el caso de los países latinoamericanos, se profundizará en la vinculación entre el riesgo macroeconómico y su impacto en el ámbito microeconómico.

Se intentará proveer un marco conceptual y metodológico que guíe la toma de decisiones vinculadas a la estrategia de las organizaciones en el marco de sistemas económicos inestables, a través de un modelo híbrido que combine componentes heurísticas con modelos formales que reflejen más fielmente el riesgo en contextos turbulentos o de desequilibrios estructurales propios de los mercados emergentes.

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA Y DE LA HIPÓTESIS

Uno de los principales problemas radica en la falencia que ostenta la ciencia económica para explicar y gestionar las dinámicas observadas en períodos de crisis. En términos teóricos, esto se traduce en la falta de desarrollo y consenso del uso de sistemas dinámicos inestables. Esto es, la tradición del uso de modelos estables, de la parsimonia y del análisis de medias y varianzas continúa aún siendo muy influyente en el ámbito de la ciencia económica. Esto ha generado que frente a una realidad cada día más volátil, los argumentos y capacidad explicativa de los fenómenos pierdan consistencia. En este sentido, de acuerdo a Smithers (2010), dado todo un conjunto de debilidades reales y percibidas, la ciencia económica es vista con menor "respeto" que en el pasado. En parte esto responde a un cambio de paradigma. La hipótesis de los mercados eficientes tuvo una influencia dominante, particularmente en la economía financiera. No obstante, mientras que por un lado nunca ha sido universalmente aceptada y por otro sus críticos están actualmente en ascenso, ninguna alternativa fehaciente ha sido consensuada. Se está por lo tanto en medio de un cambio de paradigma, con la consecuente falta de consenso acerca del marco teórico aplicable a la problemática.

En el área financiera, el problema principal radica en que el uso de las herramientas matemáticas y estadísticas tradicionales, como los modelos *ARIMA*, el *CAPM* y el modelo de *Value at Risk*, no generan buenas estimaciones de evoluciones futuras y del riesgo en contextos turbulentos, recurrentes en mercados emergentes, desestimando la ocurrencia de eventos extremos, evoluciones aperiódicas y alta volatilidad. Tal es así que buena parte de los profesionales que manejan *portfolios* de inversión y estrategias financieras de las organizaciones apelan al uso de modelos heurísticos, en detrimento de los formales. Dentro de tal situación, se propone apelar al uso de modelos híbridos, que complementando el uso de la heurística conjuntamente con meta-modelos que captan más fielmente la evolución del riesgo en mercados emergentes.

En el área económica, se registran debilidades en el marco conceptual necesario para estudiar economías emergentes, sobre todo en período de crisis. Esto se traduce en una falencia muy importante en la aplicación de herramientas vinculadas a la planificación de las organizaciones. Esto es, cómo gestionar el riesgo en un país emergente dentro de un contexto de incremento de la volatilidad y en un marco de complejización de la arquitectura del sistema económico mundial.

Por ello, la hipótesis global que se tendrá como guía es que la mejor representación de los sistemas económicos en tiempos de crisis es mediante los modelos complejos y la dinámica no-lineal. De acuerdo a esto, la hipótesis particular que se pretende poner a prueba es que las dinámicas emergentes simuladas en base a modelos de agente generan mejores representaciones del riesgo financiero en períodos de crisis.

Alcance de la hipótesis

En cuanto a las dimensiones espaciales y temporales el estudio se refiere al mercado bursátil mundial durante el 2003-2010 y a la performance macroeconómica de Latinoamérica y Argentina en el marco de la crisis internacional de 2007-2009. En cuanto al significado de los conceptos clave, por riesgo financiero se entenderá a los cambios abruptos en los valores de los índices bursátiles.

En síntesis, el presente trabajo de tesis abordará la siguiente problemática:

1. El paradigma estadístico, ¿es la forma más apropiada de estimación del riesgo en sistemas complejos?
2. ¿Cuáles son las "lógicas" que gobiernan un sistema complejo?
3. ¿Cómo se gestiona un fenómeno complejo?
4. ¿Cuáles son las particularidades de los mercados de capitales de países emergentes?
5. ¿Cuál es la forma de modelización de la de la evolución de activos más confiable en períodos de alta volatilidad?

6. ¿Qué tipo de modelos son los más útiles para guiar la toma de decisiones de los profesionales en finanzas en períodos turbulentos?

ESTRUCTURA DEL TRABAJO

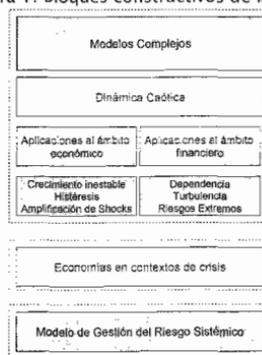
El trabajo se organizará en tres bloques constructivos principales, los cuales a su vez estarán integrados por distintos elementos.

En el primer bloque se desarrollará el marco conceptual vinculado a modelos complejos y dinámica caótica, y sus respectivas aplicaciones al ámbito económico y financiero. En el mismo se resumirán algunos aportes teóricos.

El segundo bloque, corresponde al análisis empírico de la tesis, donde se describen y exploran las dinámicas y hechos estilizados de los casos estudiados.

El último bloque constructivo está constituido por la re-lectura de los resultados empíricos alcanzados en función del marco teórico descrito, analizando la correspondencia entre ambos bloques. Es aquí donde se fundirá la construcción de la propuesta de la tesis, derivando en el resumen de los lineamientos necesarios para construir un modelo gestión del riesgo sobre el enfoque emergente.

Figura 1: Bloques constructivos de la tesis



Fuente: Elaboración propia

Especificaciones de los contenidos de los bloques constructivos:

- En el marco teórico se intentarán sintetizar definiciones, lineamientos, caracterizaciones y límites al concepto de sistemas complejos. Se especificarán los

resultados principales y la construcción conceptual de los mismos, especialmente en lo referido a los sistemas sociotécnicos adaptativos. Se estudiarán los denominados modelos de agente o *agent based models* (ABM's). Se especificarán cuáles son las conexiones o analogías con el estudio de casos económicos, específicamente en aquellos donde puedan extraerse conclusiones en relación a la caracterización del riesgo de un fenómeno económico-financiero.

En segunda instancia se procederá al estudio de las trayectorias ulteriores que pueden ser generados mediante los modelos estudiados, explorando la factibilidad de la aplicación de dinámica compleja y caótica en los campos económicos y financieros. El abordaje de este bloque es puramente teórico.

- Respecto al estudio empírico, se realizará el siguiente enfoque:

En primer lugar se estudiará la dinámica del mercado de capitales a través de los índices bursátiles de los principales mercados mundiales. El período analizado parte desde inicios del 2003 hasta fines del 2010, donde se compara el estado de los mercados durante la crisis *subprime* con su "historia" previa. En esta sección se evaluará la performance de los indicadores estadísticos tradicionales en la medición del riesgo de mercado.

En segundo lugar se estudiará el caso de América Latina en el marco de la crisis económica internacional de 2007-2009. Teniendo en cuenta que la propagación de crisis en la mencionada región se vincula a cuestiones estructurales y no específicas del mercado financiero, se estudiará la evolución macroeconómica de la región y el impacto de la crisis en las finanzas públicas de los principales países del bloque. Se identificarán particularidades en el impacto y la performance macrofiscal ulterior, tratando de diferenciar el modelo de análisis de estas economías respecto a las desarrolladas.

El abordaje de este bloque es de tipo empírico, es decir, se llevará adelante un análisis experimental de tipo longitudinal en base a estadísticas básicas (fuentes primarias) y resultados de diversos indicadores (fuentes secundarias). Las fuentes de información a consultar son principalmente datos de la CEPAL, del FMI, y del Banco Mundial, para el caso de Latinoamérica y la base de datos de *Bloomberg* para el caso de los índices bursátiles.

- La última arista que compone este proyecto es la aplicación de la teoría de los sistemas complejos al ámbito de la gestión del riesgo. Esta visión se ubica en el ámbito de la más alta jerarquía en el proceso de toma de decisiones, proveyendo un marco teórico alternativo vinculado al planteo de la estrategia de administración del riesgo. De acuerdo a los hechos estilizados y dinámicas evidenciadas en los

análisis macro y micro antes mencionados, se procederá a contrastar la correspondencia entre la evidencia empírica y el marco conceptual desarrollado en la tesis (sistemas complejos). De acuerdo a lo anterior, se especificarán lineamientos para la construcción de un modelo de gestión del riesgo sistémico. Es decir, se incorporarán elementos de la macroeconomía latinoamericana, vinculadas a la performance microeconómica del sector financiero, dando pautas y medidas del riesgo específicas para el período considerado. El marco de los modelos complejos servirá de eje directriz para especificar tales lineamientos.

PRIMERA PARTE

1. INTRODUCCIÓN

En la historia reciente, el análisis de los fenómenos económicos y financieros han sido estudiados desde una óptica combinada: utilización de herramientas aplicadas en las ciencias duras –como la modelización matemática y análisis de datos mediante indicadores estadísticos– y por otro lado estudios conceptuales con enfoques más tradicionales de las ciencias sociales (métodos comparativos, evolución histórica, etc.).

No obstante, el *mainstream* de la ciencia económica ha focalizado su desarrollo en la aplicación de herramientas matemáticas diversas para el estudio de los mencionados fenómenos económicos. Si bien tal enfoque ha recibido duras críticas, tildado de ahistoricista, apolítico y no social, se entiende justamente que tal método es lo que diferencia al análisis económico del análisis histórico, político o social, brindando técnicas diferentes e innovadoras para intentar comprender una realidad compleja, dotando al mismo tiempo de una identidad bien delimitada al método de la ciencia económica. Esto es, diferenciar la ciencia económica de los métodos ya utilizados en otras disciplinas como ser la sociología, la antropología, la historia, etc., que también estudian fenómenos económicos.

En este sentido, los instrumentos aplicados en este trabajo no se alejan de aquellos a los que tradicionalmente se adjudican a la economía. No obstante, se plantea un enfoque alternativo a nivel analítico, tanto en lo que hace al meta-modelo de análisis, como también la forma de interpretar un modelo específico.

Tal enfoque no implica en ningún sentido deslindar al análisis económico de factores históricos, políticos o sociales, sino sencillamente utilizar otro enfoque metodológico y epistemológico, dentro del cual los factores antes mencionados pueden ser contemplados. El enfoque propuesto intenta dar una visión más integradora de una realidad cada vez más compleja, donde los factores citados actúan en forma simultánea, recurrente y recursiva.

1.1. Enfoque Tradicional

Paradigma Lineal y Modelos Estocásticos

La modelización en macroeconomía apeló en sus inicios al uso de modelos matemáticos de índole más bien determinista, estableciendo relaciones entre variables mediante ecuaciones diferenciales o en diferencias. Un claro ejemplo está dado por los modelos clásicos de crecimiento económico. Más adelante, esta configuración mutó hacia una arquitectura con intervención de variables aleatorias, en el marco de los modelos de equilibrio general dinámico estocástico (EGDE o SDGE en inglés).

Por su parte, la modelización en el área de las finanzas ha sido desarrollada primordialmente mediante modelos estocásticos, centrándose en el estudio de medias y varianzas y apelando al supuesto de normalidad como primer paso de análisis. Asimismo, una parte importante de los modelos se ha sustentado en relaciones lineales, lo cual significa, básicamente, que por cada acción debe esperarse una reacción proporcional (Peters, 1996).

En todos los casos, el paradigma lineal¹ ha sido ampliamente desarrollado dado su fácil manejo, resolución y la virtud de arrojar, en general, soluciones o puntos de equilibrios únicos o al menos reducidos en los modelos estudiados. Pero principalmente brinda herramientas útiles y de fácil manejo para analizar el fenómeno estudiado.

Como se verá más adelante, con la consolidación del paradigma científico tradicional, las primeras formas de modelización se basaron justamente en ecuaciones diferenciales relativamente simples, las cuales fueron eje del determinismo *newtoniano* y *laplaciano*, y sirvieron para modelizar sistemas simples y poder "determinar" el futuro de dicho sistema (Muñoz, 2011).

Con el advenimiento de sistemas con más grados de libertad surgió el sistema de precisión o paradigma estadístico. En este sentido, los modelos estocásticos fueron y son ampliamente utilizados en numerosas disciplinas y, básicamente, permiten determinar el futuro del sistema con un determinado margen de error.

L

¹ Sistemas lineales o linealización de sistemas no-lineales en el entorno de los puntos de equilibrio.

No obstante, como se verá más adelante, ambos enfoques (determinismo puro y sistema de precisión estadístico) generan fallas de estimación (e interpretación) en fenómenos que se denominarán "complejos".

1.2. Tradición Científica

La ciencia económica no ha sido ajena al paradigma de la ciencia tradicional. Incluso ha estado por detrás de los desarrollos más novedosos de otras disciplinas. No obstante, la tradición en la ciencia económica ha demostrado que la misma nunca ha sido reacia a adoptar cambios. Aún más allá, se ha nutrido en forma continua de diversos campos del saber científico, como ser la historia, la matemática, la física, la sociología, y más recientemente de la psicología.

No obstante, los núcleos centrales o núcleo duro en el sentido de Lakatos (1976) del pensamiento económico aún arrastra la fuerte herencia de los paradigmas determinista y estadístico.

1.3. El Peso de la Herencia

"Dadme las leyes que gobiernan el fenómeno y las condiciones iniciales del mismo, y determinaré su estado futuro y reconstruiré su pasado"

Laplace (1886)

Según Ilya Prigogine (1979), una de las más importantes fechas en la historia de la humanidad fue el 28 de abril de 1686, cuando Newton presenta sus *Principia*, donde introduce conceptos que se usan hoy en día: masa, aceleración, inercia. Siguiendo a Prigogino (1979),

en la ciencia clásica el énfasis estaba en las leyes independientes del tiempo. Una vez dadas las condiciones iniciales, estas leyes eternas determinan para siempre el futuro tal como habían determinado el pasado. Esta visión levanta nuestro entusiasmo, ya que su mensaje es el de que el mundo es inteligible para la mente del hombre. Sin embargo plantea un problema, al aparecer el mundo descifrado de esta forma como un autómata, como un robot.

El modelo elaborado por Newton consistía en un conjunto de relaciones causales presentadas mediante sistemas de ecuaciones diferenciales, de corte netamente determinista y que arroja un pequeñísimo margen de error al momento de predecir los fenómenos estudiados. La simpleza, orden lógico y consistencia del modelo newtoniano generó que el mismo sea contemplado como el arquetipo de la ciencia, fundando la que se pasará a denominar la ciencia clásica.

En esa línea de pensamiento, el motor de la evolución científica estaba dado por la búsqueda de un puñado de leyes generales y perdurables a lo largo del tiempo, en la mayoría de los casos con las siguientes características:

- Determinismo subyacente
- Invarianza respecto a la inversión del tiempo
- Estructuras no disipativas

Unos años más adelante, Laplace (1886) pondrá el otro gran sello de la ciencia clásica, consolidando la visión mecanicista del universo y sus fenómenos:

Debemos considerar el estado presente del Universo como el efecto de su estado anterior y como causa de su estado futuro. Una inteligencia que, por un instante, conociese todas las fuerzas de que está animada la naturaleza y la situación respectiva de los seres que la componen, si además fuese lo bastante profunda para someter a éstos al análisis (matemático), abrazaría en la misma fórmula a los movimientos de los mas grandes cuerpos del Universo y del átomo más ligero: nada sería incierto para ella y el devenir, como el pasado, estaría presente ante sus ojos.

El espíritu humano ofrece, en la perfección que ha sabido dar a la astronomía, un pálido ejemplo de esta Inteligencia. Sus descubrimientos en mecánica y en geometría, junto con el de la gravitación universal, lo han puesto en condiciones de abrazar en las mismas expresiones analíticas a los estados pasados y los futuros sistemas del mundo.

Esta visión conciliadora de la realidad universal, (planteando la búsqueda de regularidades y principios fundamentales aplicables a todos los tipos de universos o dimensiones, la figura del equilibrio, las relaciones de causa-efecto, la simplicidad y las relaciones perdurables entre variables) debido a su grandioso éxito en ciertos campos de las ciencias duras, rápidamente se propagó como una forma de saber científico, más que como un método puesta al servicios de la solución de problemas

específicos. La visión de Newton se instauraría como un paradigma, con una fuerte presencia en la cultura científica contemporánea.

1.4. El traspaso a la ciencia económica

La ciencia económica no fue ajena a la visión mecanicista del mundo, principalmente en lo que refiere al método aplicado por la corriente neoclásica. En buena parte, llevada adelante por la dupla "Popper-Hayek" cuyo enfoque consiste básicamente en aplicar el individualismo metodológico como herramienta epistémica para el análisis económico.

La visión del individualismo metodológico constituye la justificación epistemológica para abordar el estudio de los fenómenos económicos desde un enfoque parcialista (reduccionista), permitiendo aplicar todo el instrumental físico-matemático a la modelización de la economía.

No obstante, para las ciencias sociales en general, el esquema metodológico *popperiano* conceptualizado en la secuencia lógica situacional, tecnología social fragmentaria e ingeniería social (Gómez, 1995) tendría consecuencias inaceptables para el entendimiento de la problemática social, reduciendo el entramado de un sistema arquetípicamente complejo a un conjunto de partes separables que pueden ser entendidas y analizadas en forma aislada del conjunto del cual forman parte.

Esta visión induce y justifica la participación del "experto" o especialista focalizado en resolver problemas específicos (y aislados), lo que al mismo tiempo intenta construir la visión de la neutralidad analítica en la ciencia (económica). Esto es, aislar al fenómeno ("*ceteris paribus*") implica, en ciencias sociales, neutralizar la complejidad intrínseca del sistema (que en este caso se trata de un sistema sociotécnico). Al dejar de lado las interrelaciones multidireccionales entre los entes o elementos constitutivos del sistema resulta posible, en forma implícita, hacer un análisis parcial y científicista del problema (en este caso, fenómenos sociales - fenómenos económicos).

Es importante mencionar que este enfoque reduccionista no es tomado como un conjunto de hipótesis de apoyo o supuestos de tipo operativo, sino que implícitamente

definen el objeto de estudio y "moldean" la idea misma de qué es la economía; en palabras de Gómez (1995),

debemos percatarnos de que dichos supuestos, especialmente los ontológicos, determinan el ámbito de la economía; más precisamente estatuyen qué es la economía". Siguiendo al autor, a la adopción del individualismo metodológico subyace una decisión normativa de negar toda ontología no atomista-individualista. Es precisamente tal decisión la que permite tanto a Hayek, como a Friedman y a Popper, rechazar explícitamente el holismo que ellos visualizan en Marx y sus descendientes intelectuales como Adorno.

En síntesis, esta postura epistémica implícita se convirtió en el principal marco teórico de la ciencia económica contemporánea, cristalizada en la denominada corriente neoclásica. Este marco teórico permitió la aplicación de la modelización matemática y estadística "tradicional" al análisis económico. Resulta oportuno definir a partir de este momento que se entenderá por enfoque tradicional, lo cual se tomado como punto de partida para presentar la alternativa propuesta en este trabajo. Básicamente se estará haciendo referencia a los siguientes elementos:

- Modelización en base a modelos deterministas o estocásticos
- Separación estricta entre variables y parámetros
- Capacidad de aislar elementos para estudiar el impacto de impulsos exógenos
- Capacidad de vincular causas con efectos
- Preponderancia (aunque no exclusividad) de aplicación de relaciones lineales en el modelado
- Uso del supuesto de agente representativo (agregación simple)
- En el marco del análisis estadístico:
 - Eje fundamental en el análisis de medias y varianzas
 - Apelación recurrente al supuesto de normalidad

1.5. Nuevas Rutas

Las nuevas visiones que han y están siendo debatidas al interior de la comunidad científica se sintetizan en una lectura superadora del paradigma tradicional, motivadas por las fallas de aplicación del mismo en ciertos entornos o universos.

Para citar algunos ejemplos, la teoría de la relatividad marcó un límite a la validez de las ecuaciones de Newton (cuando se trabaja con velocidades próximas a la de la luz), mientras que la teoría cuántica hizo lo mismo al estudiar sistemas microscópicos

(partículas atómicas). En este sentido, se entiende que la mecánica clásica es un caso particular de la mecánica cuántica.

No obstante, lo que aquí interesa, es observar cómo nuevas teorías alternativas van instaurando poco a poco nuevas visiones en la cultura y tradición científica. En este sentido, para aproximar una primer síntesis a través de un puñado de palabras o conceptos clave, puede afirmarse que actualmente esta puesto en duda el determinismo, la reversibilidad en el tiempo, la idea clásica del equilibrio, la regularidad como normalidad, la preponderancia de la modelización lineal, la parsimonia como arquetipo de modelo matemático y la capacidad de predecir, entre otros. Citando nuevamente a Prigogine (1979):

(...) se vieron las leyes eternas como las únicas que expresaban la racionalidad de la ciencia. La temporalidad no siendo contemplada más que como una ilusión. Esto ha dejado de ser verdad hoy día. Hemos descubierto que lejos de ser una ilusión, la irreversibilidad juega un papel esencial en la naturaleza y se encuentra en el origen de muchos procesos de organización espontánea. Sabemos hoy día que estos procesos son presumiblemente el fundamento de la autoorganización en sistemas biológicos. Nos encontramos en un mundo azaroso, un mundo en el cual la reversibilidad y el determinismo son solamente aplicables a situaciones límite y casos simples, siendo al contrario la regla la irreversibilidad y la indeterminación.

En efecto, dada la existencia de una realidad cada vez más compleja, donde el número de variables intervinientes es de tal magnitud que ni siquiera puede ser fehacientemente especificado, donde las economías, los mercados y los agentes económicos son interdependientes y reaccionan en tiempo real, en forma casi simultánea, donde los cambios son cada vez más abruptos y fugaces, donde la volatilidad tiende a ser creciente en el tiempo, donde se las relaciones de propiedad y la forma de generar ganancias transmutan hacia figuras no tradicionales, hace que, en ciertos ámbitos, los modelos clásicos dejen de ser útiles para analizar hechos y fenómenos contemporáneos, no obstante su virtud de simplificar el análisis. Frente a tal situación, y con el advenimiento de nuevas herramientas informáticas, se propone volver a indagar en la conveniencia o no de utilizar métodos alternativos para analizar, en este caso, fenómenos económicos, financieros y del ámbito de la gestión.

Ante la realidad mencionada puede explotarse el tercer paradigma matemático, ampliamente desarrollado y discutido en la actualidad, que es el "Caos en Desarrollo", el cual surge de la imposibilidad de aplicar el paradigma estadístico en fenómenos

altamente volátiles. Si bien más adelante se desarrollará qué se entiende por caos o teoría del caos, puede adelantarse que en fenómenos altamente complejos, se han desarrollado algoritmos y técnicas de análisis que permiten determinar la existencia de ciclos irregulares, bifurcaciones en la evolución temporal de los sistemas y múltiples puntos de equilibrio, fenómenos que según los paradigmas anteriores eran interpretados como aleatorios o incluso "anómalos".

1.6. Paradigmas

Una forma pragmática de sintetizar lo expuesto hasta el momento es mediante el siguiente interrogante: una perturbación, ¿Procede de un sistema estocástico?, ¿o es fruto de la propia evolución del sistema dinámico (caótico) subyacente? Es decir, una situación no contemplada por un modelo tradicional, ¿es una anomalía, es un fenómeno puramente aleatorio, o es una expresión del propio sistema complejo?

El enfoque para dar la respuesta a dicho interrogante especificará dentro de qué "paradigma" estará inserto el modelizador. Los grandes paradigmas matemáticos se resumen en el cuadro siguiente.

Tabla 1: Paradigmas matemáticos

PARADIGMAS MATEMÁTICOS	
-	ECUACIONES DIFERENCIALES: Sirvieron para modelizar sistemas simples y determinar el futuro del sistema
-	ESTADÍSTICA: Sirvió para estudiar fenómenos con mayor cantidad de variables intervinientes, persiguiendo mejorar la precisión de las estimaciones en sistemas con cierta regularidad.
-	CAOS EN DESARROLLO: Surge dada la imposibilidad de aplicar el paradigma estadístico en comportamientos caóticos.
-	INTERROGANTE: Una perturbación: <ul style="list-style-type: none"> o ¿procede de un sistema estocástico? o ¿o es fruto de la dinámica de un sistema caótico (emergente)?

Fuente: Elaboración propia

Vale destacar que este trabajo consiste en la exploración del tercer paradigma, el caos en desarrollo, el cual será contextualizado en un área más amplia denominada teoría de la complejidad.

En suma, el orden del planteo de este trabajo es el siguiente:

- Se analiza la factibilidad de la aplicación de los sistemas complejos en el análisis de los fenómenos económicos.
- Se observa que los modelos de agente (Agent Based Models o ABM's) constituyen una herramienta operativa para modelar a un fenómeno económico dotándolo de elementos que caracterizan a los sistemas complejos. Adicionalmente, los ABM's se presentan como alternativa al supuesto de agente representativo y racionalidad esgrimidos por la ciencia económica.
- Se observa que en muchos casos los ABM's generan dinámica caótica.

La sección siguiente está enteramente dedicada a sintetizar los aspectos fundamentales de la teoría de la complejidad y la dinámica caótica. Luego se desarrollan los modelos de agente, presentando asimismo algunos ejemplos.

En la tercera sección se presentaran casos empíricos de análisis. En base a los resultados de los relevamientos, se evalúa la factibilidad de aplicación del marco teórico descripto. En la última sección se integran los contenidos en el marco de un esquema de gestión del riesgo.

SEGUNDA PARTE

2. SISTEMAS COMPLEJOS

Nunca pude, a lo largo de toda mi vida, resignarme al saber parcializado, nunca pude aislar un objeto de estudio de su contexto, de sus antecedentes, de su devenir. He aspirado siempre a un pensamiento multidimensional. Nunca he podido eliminar la contradicción interior. Siempre he sentido que las verdades profundas, antagonistas las unas a las otras, eran para mí complementarias, sin dejar de ser antagonistas. Nunca he querido reducir a la fuerza la incertidumbre y la ambigüedad.

Morin (2007)

Social institutions emerge, survive, and die in concert with distinctive human behaviors — cooperation with peers, hostility towards outsiders, and adaptive learning, for example. Traditional models used by economists and sociologists often overlook the important roles these behaviors play, relying instead on artificial, idealized contexts with little semblance to real-world human interaction. SFI's behavioral dynamics research draws from physics and many other disciplines to study complex human behavior. It incorporates mathematical modeling and empirical case studies to address problems of potentially great contemporary practical relevance, such as economic crises, conflict, and wealth inequality.

Santa Fe Institute web page (2011)

2.1. Teoría de La Complejidad

El eje principal de este capítulo es delimitar el concepto de complejidad, al definir qué se entenderá por sistema complejo en vistas del análisis empírico que se realizará más adelante en este trabajo. Para ello, se estudiarán algunos modelos para intentar identificar cuáles podían ser considerados modelos complejos, contrapuestos a los modelos clásicos antes especificados.

A tales efectos, se presentarán algunas clasificaciones y características de diferentes tipos de sistemas (modelos), para identificar aquellos que presentan cualidades propias del paradigma de la complejidad.

2.1.1. El Concepto de Complejidad

La palabra complejidad, al igual que el término caos, es utilizado en forma cotidiana en el lenguaje vulgar haciendo referencia en general a situaciones difíciles de interpretar o cuya resolución no es determinable a priori. En cambio, en el ámbito académico, el mismo concepto genera grandes controversias, sobre todo cuando es aplicado en forma transdisciplinar.

Para la matemática, la complejidad tal vez esté asociada a la teoría de las bifurcaciones, vinculada a los cambios cualitativos que pueden generarse en un sistema dinámico frente a cambios en los valores de los parámetros.

En física, la complejidad está vinculada al concepto de autoorganización u organización espontánea. Esto se da en aquellos sistemas dinámicos que transmutan del caos al orden y viceversa.

En economía, no existe una definición bien acuñada de complejidad. Si bien la mayoría de los autores referentes de la ciencia económica califican a los sistemas económicos como inherentemente complejos, esta calificación no hace referencia, al menos en forma explícita, a los conceptos matemáticos y físicos antes mencionados. Tal vez se aproxime más a una calificación vulgar. No obstante, amén de la no existencia de una delimitación formal de la "economía de la complejidad", muchas líneas de investigación se han valido del uso de conceptos y herramientas devenidos de las definiciones matemáticas y físicas para profundizar el análisis económico, como por ejemplo la física estadística y dinámica caótica. Es en este sentido que la complejidad en economía puede estar vinculada a una propuesta alternativa al núcleo duro de la teoría neoclásica, esto es, el supuesto de racionalidad por un lado y el análisis de equilibrio por otro (Holland, 1988).

A continuación se resumirán algunas nociones de lo que se entiende por sistema complejo en general para luego introducir el concepto de sistema complejo adaptativo y modelos de agente.

2.1.2. Sistemas Complejos

Rolando García (2000) brinda una síntesis de lo que se entiende por sistema complejo, delimitando en forma bastante precisa los límites de tales estructuras, a las cuales denomina "no descomponibles". La distinción general es la siguiente: los sistemas complejos o no descomponibles son aquellos donde sus partes no pueden ser analizadas en forma independiente del conjunto del cual forman parte. En este sentido, las componentes de un sistema son interdefinibles, es decir, se determinan mutuamente. A su vez cada uno de ellos suele constituir también una unidad compleja (subsistema). Se desprende que una característica distintiva es que la estructura del sistema esta dada por las relaciones entre los subsistemas del mismo, y no por sus elementos constitutivos.

De acuerdo a Morin (1997) un sistema es una *interrelación de elementos que constituyen una entidad o unidad global. Tal definición comporta dos caracteres principales, el primero es la interrelación de los elementos, el segundo es la unidad global construida por estos elementos en interrelación.* Al igual que en toda la literatura vinculada a la complejidad, el foco esta puesto más en las relaciones que en los elementos, y cómo son las relaciones las que conforman un sistema.

Según Schuchny (2001), *"un sistema complejo puede ser definido como compuesto por una gran cantidad de elementos interactuantes, capaces de intercambiar información entre ellos y el entorno, y de adaptar sus estructuras internas como consecuencia de tales interacciones. Una característica propia de sistemas de este tipo es la existencia de interacciones no lineales entre sus componentes, que son las responsables de producir comportamientos emergentes en los que el todo es más que la simple suma de las partes. Vistos en forma agregada, estos comportamientos no pueden ser atribuibles a la acción aislada de cada elemento por separado sino que son el resultado de su acción colectiva"*.

En línea con lo anterior, Mitchell (2009) propone la siguiente definición de sistema complejo: *un sistema en donde grandes redes de componentes sin controlador central y con simples reglas de comportamiento dan lugar a comportamientos colectivos complejos, sofisticados métodos de procesamiento de la información y adaptación a través del aprendizaje o la evolución.* Una definición alternativa propuesta por la misma autora es la siguiente: *un sistema complejo es aquel que exhibe comportamientos emergentes no triviales y auto-organizados.*

Ahora bien, además de la definición conceptual, otra forma de delimitar a un sistema complejo es mediante una definición operativa, es decir, a través de los instrumentos utilizados para su tratamiento. Respecto a esto último, Schuchny (2001) sostiene que *"muchos sistemas complejos no resisten el tratamiento analítico (no son matematizables) y la única forma de explorarlos es a través del tratamiento computacional mediante las simulaciones numéricas. Técnicamente podemos decir que en general los sistemas complejos son sistemas computacionalmente irreducibles; esto significa que la única manera de conocer su evolución es a través de la observación directa o simulándolo utilizando para ello otro sistema de similar complejidad²".*

Cabe destacar que podrían seguir listándose innumerables descripciones del concepto de complejidad y sistema complejo (según Rosser, Seth Loyd, del Massachusetts Institute of Technology -MIT-, ha "coleccionado" más de 45 definiciones distintas). Por ello, a los fines de proveer una síntesis, se pueden distinguir al menos cuatro clases de definiciones:

- Definiciones estructurales, que resaltan la existencia de numerosas interrelaciones complejas, estructuras donde gran cantidad de agentes heterogéneos interactúan en forma no-lineal en continua adaptación (Pryor, 1995; Stodder, 1995).
- Definiciones computacionales, como la de Leijonhufvud (1993), que califican los sistemas complejos como aquellos en los que existe una dificultad extrema para calcular soluciones para problemas de optimización, entre otras por cuestiones de indecibilidad surgidas de la necesidad de los agentes de interpretar el modelo que de ellos mismos hacen otros agentes, *ad infinitum*.
- Definiciones operativas, como la ya mencionada de Schuchny (2001), acerca de la incapacidad de la aplicación del tratamiento analítico y la necesidad del uso de simulaciones.
- Definiciones de cariz filosófico, que enfatizan el cambio de perspectiva en la relación hombre-naturaleza, las que sugieren que la complejidad debe definirse inductivamente partir de los distintos esfuerzos de modelado de los investigadores.

² Este punto resulta un tanto discutible, dado que algunos modelos que según ciertas visiones pueden clasificarse como "complejos" fueron inicialmente planteados en "lápiz y papel", como por ejemplo el modelo de segregación de Schelling (1971), amen de que luego fueron explotados con mayor profundidad mediante técnicas computacionales. Este punto será discutido más adelante en las defensas planteadas por Czilian (2009) a los ABM.

En este trabajo se tomará como guía las definiciones clasificadas dentro de los tres primeros grupos listados.

Antes de comenzar a profundizar en la descripción teórica de los sistemas complejos adaptativos, falta definir en forma explícita tres conceptos antes mencionados, el de emergencia, el de complejidad desorganizada y el de complejidad organizada:

- Emergencia: Agentes individuales o comportamientos locales se funden en una dinámica agregada que, en cierto sentido, se encuentra desvinculada de sus orígenes. Es decir, los detalles del comportamiento local no dan cuenta del comportamiento agregado.
- Complejidad desorganizada: está vinculada a la ley de los grandes números. En conjuntos grandes, el efecto de los desvíos estocásticos se compensa. La influencia de las entidades locales tiende a estar suavizada. En estos casos se genera un comportamiento global estable. Se aproxima a un comportamiento normal (mientras que es difícil predecir dónde caerá particularmente una gota, es fácil ver hacia dónde se dirige la corriente).
- Complejidad organizada: Es lo contrario. Los efectos no se compensan sino que se potencian. Se generan comportamientos emergentes a partir de la interacción de los agentes. Los fenómenos no son normales (bajas en los mercados, embotellamientos, riñas, etc.).

2.1.3. Los modelos de agente

Si bien este marco teórico es general y no se han introducido, todavía, aplicaciones al ámbito de la economía y las finanzas, el desarrollo de las características de los sistemas complejos implícitamente estará orientado a una lectura que posteriormente permita aplicaciones en dichos ámbitos. Es por ello que en este apartado se comenzará a introducir el concepto de modelo de agente, las cuales hipotéticamente generan mejores representaciones de las dinámicas observadas en sistemas sociotécnicos.

Como fue dicho, una forma de representar sistemas dinámicos adaptativos es mediante los denominados modelos de agente o *agent-based-models* (ABM). Los protagonistas de estos modelos son los agentes, que no son otra cosa que entidades a las cuales se les asigna una regla de comportamiento. Estos agentes pueden ser

entidades biológicas, entidades físicas, individuos o grupos de individuos o instituciones (Cazian, 2009). En el marco operativo, son representados mediante un algoritmo que refleja una regla de comportamiento.

Estos modelos se estructuran de "abajo hacia arriba" (*bottom - top*):

1. En primer lugar se definen cuáles son los agentes y sus características
2. Se define una regla de comportamiento para cada uno de ellos
3. Se resuelve el modelo (generalmente mediante una simulación) observándose la trayectoria que el mismo genera.

De esta forma, el resultado global del modelo es generado por las sub-unidades (agentes) que lo conforman (de allí el aforismo "*botton-top*").

No obstante, para que el modelo sea caracterizado como complejo, debe introducirse algún tipo de heterogeneidad en la configuración de agentes o, como se verá más adelante, algún proceso de adaptación (aprendizaje). Por ello, una definición más específica para el ámbito de la economía es "sistema complejo adaptativo".

2.1.3.1. Un ejemplo preliminar: La ovación de pie.

Para comenzar a definir desde un enfoque más operativo las características de un modelo complejo, se sintetizará un caso que analiza las "ovaciones de pie" (Schelling 1978; Miller and Page 2004). Este modelo analiza el fenómeno de cómo el público de un auditorio termina total o parcialmente ovacionando de pie a un espectáculo determinado.

Enfoque "simplificado". Una forma de modelización podría ser la siguiente:

- Asumir que un número N de asistentes es afectado por una señal (s) que depende de la calidad de la actuación (q).
- La señal sigue el siguiente proceso (estocástico): $s(q) = q + e$, siendo e una variable aleatoria normal $(0,1)$.
- La persona se pone de pie solamente si $s(q) > T$.

Este modelo sería de utilidad para proyectar el número de personas que se pondría de pie, analizando la calidad de la actuación, el umbral " T " e incluso la desviación estándar de la señal.

No obstante, Miller y Page (2007) plantean el interrogante de si este modelo refleja ciertos hechos determinantes en el fenómeno analizado, como por ejemplo, la

influencia del entorno. En este caso, cómo responde el público al comportamiento del resto. Para soslayar esto, puede introducirse un parámetro que indique el porcentaje de personas que deben pararse para que todo el resto lo haga. En este caso, se dan dos estados:

- Si el porcentaje del público inicial es inferior a dicho porcentaje, solo quedará de pie el público inicial
- Si es superior, todo el auditorio se pondrá de pie.

Sin embargo, esta modificación lleva a dos escenarios extremos, dos estados estacionarios que se alcanzan en forma inmediata (como mucho en dos iteraciones), que tampoco se condice totalmente con los hechos observados.

2.1.3.1.1. Camino hacia un modelo complejo.

Se incorporan las siguientes características:

Se asume que los asistentes tienen asientos asignados (no se sientan en forma aleatoria) y tienen “conexiones” con un número determinado del resto de asistentes. En otras palabras, existen grupos de asistentes que son conocidos³.

Configurando la distribución del auditorio en grupos de asistentes conocidos, pueden generarse nuevas dinámicas. Por ejemplo, introducir el hecho que las señales estén influenciadas por el comportamiento de alguno de los integrantes del grupo (si uno del grupo se pone del pie el resto del grupo también lo hará) o por otros grupos (si un grupo se pone de pie las probabilidades de que lo haga otro grupo aumentarán). Esto genera que haya varias jugadas o iteraciones hasta que el sistema alcance un equilibrio, generando efectos cascada a lo largo del auditorio (de esta forma pueden segmentarse grupos de pie y grupos sentados).

Otro factor a destacar es que la localización importa: los situados al frente tienen la menor información acerca del estado del auditorio (del entorno) pero la mayor influencia, al contrario de quienes están situados al fondo del auditorio.

Ahora bien, al margen de las dinámicas diferentes, debe dejarse en claro que el caso complejo no es reducible matemáticamente, sino que debe ser simulado computacionalmente. Ello implica que, si bien el modelo replica dinámicas más asemejables al fenómeno, es necesario incluir un mayor número de parámetros y supuestos. Por ejemplo, cómo se distribuyen los grupos de personas, qué probabilidad

L

³ Es un supuesto razonable asumir que la gente asiste al teatro en grupo, y que los asientos habían sido reservados de forma tal que el grupo se sienta todo junto.

se asigna al hecho que si se levanta uno se levante el resto, cómo asignar una probabilidad mayor a los situados al frente respecto a los del fondo, etc.

Tabla N°2: Comparación entre los resultados del modelado simple y el complejo

Modelo Tradicional	Modelo Complejo
Permanecen de pie el porcentaje inicial o todos	Cualquier porcentaje de espectadores pueden quedar de pie
En dos iteraciones se alcanza el resultado	El pseudo-equilibrio se alcanza luego en muchas mas iteraciones, incluso generando cascadas a medida que el sistema evoluciona
Todos los agentes tienen la misma influencia	La influencia depende de los conocidos (grupo) y la ubicación

Fuente: Elaboración propia, en base a Miller y Page (2007)

2.1.3.2. Agentes heterogéneos

En el caso anterior se introdujo una forma de contemplar la influencia del entorno en el comportamiento de los agentes. No obstante, un caso muy utilizado a lo largo de la literatura de los sistemas complejos es definir dos tipos de agentes, que se diferencian por la forma que aplican su estrategia de comportamiento (de allí la denominación "agentes heterogéneos"). Por ejemplo, suponiendo que el estado presente del agente (o su acción presente) depende de su visión que tenga acerca del futuro, se plantean dos esquemas de formación de expectativas:

- Agentes estructuralistas o "racionales": es decir, aquellos que "conocen" el modelo, aplican un mecanismo de valuación y actúan en consecuencia, de acuerdo a su conocimiento del mismo.
- Agentes "ruidosos" o adaptativos: son aquellos que predicen el estado futuro extrapolando el pasado.

Nótese que el primer conjunto de agentes son los que proveen previsibilidad y estabilidad al modelo, mientras que el segundo conjunto agrega componentes de inestabilidad e incluso divergencia. Es decir, si los agentes fuesen homogéneos, y del primer grupo, el sistema sería totalmente estable, y cualquier perturbación sería corregida automáticamente (el agente "sabe" hacia donde va). En cambio, si la totalidad de los agentes fuesen del segundo grupo, una perturbación tendería a ser profundizada, dado que los agentes utilizan el pasado para predecir el futuro (potencian la tendencia o la perturbación).

Ahora bien, el sistema complejo surge justamente cuando existe un "mezcla" entre los dos tipos de agentes. No obstante, el dinamismo se incorpora a través de un mecanismo de adaptación. Es decir, en este tipo de modelos, los agentes no son racionales o adaptativos siempre, sino que pueden transitar de un grupo a otro. Esto puede generarse, por ejemplo, a través de una función de "desutilidad", que mide el error de pronóstico. Si la "desutilidad" generada por el error alcanza cierto umbral, el agente cambia su regla de formación de expectativas. Lo que imprime dinamismo al modelo es justamente el esquema de adaptación, el cual da la posibilidad de generar incluso trayectorias caóticas.

Por otro lado, en términos operativos, el mecanismo de adaptación está dado por un algoritmo determinado, el cual no necesariamente es de uso común y aceptado a lo largo de la literatura, siendo esto una de las debilidades y eje de debate de este tipo de modelización. Respecto a esto, cabe mencionar a LeBaron (1999), quien sintetiza la siguiente crítica:

(...) los modelos de agente traen aparejados otro tipo de complicaciones, como el uso de nuevos algoritmos (en muchos casos no debidamente testeados), la dificultad de calibrar en forma precisa los parámetros del modelo y el uso de supuestos muchas veces controversiales.

El énfasis está puesto en el modelado de interacciones dinámicas entre agentes de distinta naturaleza, donde su comportamiento no siempre está "micro-fundamentado" en la base a la optimización de la utilidad esperada y los mercados no siempre alcanzan un equilibrio. En su lugar, se aplican métodos heurísticos para aproximar el comportamiento de los agentes.

No obstante, el modelo antes resumido ha sido utilizado principalmente en dos aplicaciones económicas, una correspondiente al ámbito del crecimiento económico y otra al ámbito del mercado de capitales.

En la aplicación correspondiente al crecimiento económico (que se estudiará más adelante), el comportamiento de la variable relevante (nivel de producto bruto) depende de la expectativa acerca del futuro de la misma. Los agentes (racionales o adaptativos) imprimen el esquema de formación de expectativas y en base a su interacción se genera un determinado sendero de evolución del producto.

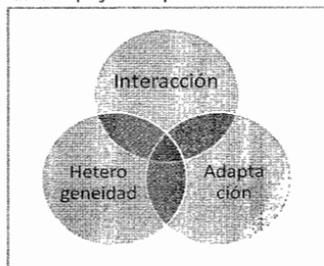
En la aplicación referida al mercado de capitales, los estructuralistas son los "fundamentalistas", es decir, los agentes que para determinar su oferta o demanda valúan un activo en base a sus *fundamentals* (por ejemplo, calculando el valor actual de los dividendos futuros esperados). En tanto, los adaptativos son aquellos que

siguen el análisis técnico, actuando según la tendencia del mercado. De la interacción entre ambos agentes surge el sendero de evolución del precio del activo en cuestión.

En estos modelos, la complejidad está dada por la "mezcla" de agentes y su interacción. Si el modelo no incorpora un mecanismo adaptativo (la posibilidad de cambiar de estrategia) la única posibilidad de observar dinámicas emergentes es cambiando exógenamente el número de agentes que siguen algunas de las dos reglas especificadas.

En suma, puede puntualizarse que una característica común en el modelado complejo en base a los ABM es la introducción de algún tipo de heterogeneidad. En el primer modelo desarrollado en el punto 2.1.3.1 (la ovación de pie) la heterogeneidad no estaba dada en los agentes sino en su ubicación y sus amistades, mientras que en el segundo esta puesta en los agentes propiamente dichos (en el ejemplo, en su regla de conducta).

Figura N°2: Sistemas Complejos Adaptativos: Condiciones Fundamentales



Fuente: Elaboración propia

Hasta aquí se han sintetizado aspectos básicos de los sistemas complejos adaptativos y su construcción a través de los ABM. El punto fundamental es que a través de los ABM es posible generar dinámica compleja, muchas veces vinculada mencionado concepto de emergencia y, en muchos casos, al concepto de caos. Dada la potencialidad de este punto, a continuación se profundizará en el significado y las implicancias de la teoría del caos, por ser uno de los elementos constitutivos de la dinámica compleja.

2.2. Dinámica Caótica

La dinámica caótica ocupa un espacio fundamental en este trabajo, principalmente en lo concerniente a su concepto y sus implicancias. Por tales motivos, el tema se desarrolla con gran profundidad. No obstante, dada la extensión del mismo, se ha decidido presentar su desarrollo como anexo. En el mismo se desarrollan las definiciones básicas de flujos turbulentos, se resume el trabajo de Lorenz (1963) en este campo y se realizan simulaciones para analizar las condiciones de estabilidad de diferentes trayectorias. En tanto, en el anexo siguiente se sintetizan las principales definiciones de sistemas y atractores.

En el cuerpo del presente capítulo se intentará sintetizar los principales conceptos de la dinámica caótica y su vinculación con los sistemas complejos y los ABM.

2.2.1. Conceptos principales

La dinámica caótica puede definirse como un sistema dinámico no-lineal con trayectorias aperiódicas en el largo plazo y que ostenta (hiper) sensibilidad a las condiciones iniciales. Asimismo, presenta dinámica atractora, es decir, su evolución esta acotada dentro de ciertos límites del espacio.

En primer lugar, que el sistema sea no lineal implica que las relaciones entre sus variables, o entre su *input* y su *output*, no son proporcionales. Esto implica que ante un *shock* o perturbación exógena el modelo puede responder en forma diferente según el momento en el cual se realice la misma.

En segundo lugar, que el sistema presente trayectorias aperiódicas⁴ en el largo plazo implica que el mismo nunca alcanza un comportamiento regular, incluso si se proyecta su evolución hasta el infinito. Cabe destacar que en los modelos tradicionales la aperiodicidad es una característica de tipo transitoria, es decir, que se genera por un lapso de tiempo acotado; pero ulteriormente el sistema se ubica dentro de un sendero regular, como por ejemplo un punto fijo o un ciclo límite (ver anexo). En el caso de la dinámica caótica, la aperiodicidad es una cualidad de tipo permanente.

L

⁴ Aperiódico o no periódico significa, simplemente, que nunca repite su comportamiento pasado.

La sensibilidad a las condiciones iniciales significa que un cambio muy pequeño genera resultados ostensiblemente diferentes. Este es el aspecto crucial que singulariza a la dinámica caótica. Implica que una perturbación exógena puede generar que el sistema cambie drásticamente su evolución, no regresando nunca a un entorno de su trayectoria previa. Incluso, algunos autores (Mindlin, 2008) hablan de "hipersensibilidad" a las condiciones iniciales, en el sentido que la magnitud de la perturbación puede ser muy pequeña, tan pequeña (infinitesimal) que puede pasar desapercibida frente al instrumento de medición. Esto trajo profundas discusiones referentes al concepto de determinismo (véase Mindlin (2008) y Lombardi (2005)).

Dinámica atractora significa que el sistema no diverge, y que su trayectoria queda "atrapada" dentro un sub-espacio. Si bien el sistema es aperiódico, esa irregularidad esta acotada a una parte de espacio de fases. En este sentido, el sistema no converge a un atractor tradicional (punto fijo, ciclo límite o toro) pero tampoco diverge, queda atrapado dentro de que se dio en denominar extraño o mas específicamente atractor caótico (Barnet *et al*, 1997). Para mayor profundidad se recomienda remitirse al anexo 1 y 2.

Resumiendo, un sistema caótico presenta una trayectoria totalmente irregular, pero generada por la propia dinámica endógena del sistema (fruto de la no-linealidad). Por otro lado, a este debe agregarse la alta perturbabilidad del sistema, donde los *shocks* exógenos afectan estructuralmente la evolución ulterior del mismo ("efecto mariposa", Lorenz, 1965).

En suma, puede sintetizarse lo siguiente:

- Comportamientos irregulares ("aparentemente aleatorios") que son generados mediante ecuaciones deterministas.
- La irregularidad responde a la dinámica endógena del sistema y no a perturbaciones exógenas aleatorias
- La sensibilidad a las condiciones iniciales hace que cualquier *shock* exógeno, por pequeño que sea, tienda a propagarse y amplificarse a medida que el sistema evoluciona, generando efectos permanentes en el largo plazo
- Esto genera que, dada la existencia insoslayable de errores de medición, la predicción de estos sistemas, o bien sea imposible, o esté acotada al corto plazo.

Ahora bien, el aspecto más importante que concierne a este trabajo es cuáles son las implicancias de este tipo de sistemas para la modelización en economía. Este tema se desarrolla a continuación.

2.2.2. Implicancias para la modelización en economía

El *mainstream* de la modelización en economía supone un sistema estable donde las fluctuaciones son generadas mediante *shocks* exógenos. Dentro de este marco, ante la ausencia de perturbaciones, el sistema no ostenta fluctuaciones y permanece en su sendero de equilibrio.

Para entender esto, es necesario primero hacer una breve referencia a los distintos tipos de sistemas. En primer lugar, la evolución de un sistema puede entenderse como la combinación de un proceso de forzamiento y un proceso de reacción. Es decir, cuáles son los factores que pueden perturbar el mismo y cuál es la relación entre la magnitud (y período) de la perturbación y la magnitud (y período) de la reacción.

De acuerdo a lo anterior los sistemas pueden clasificarse de acuerdo al siguiente cuadro (anexo 1):

Tabla N° 3: Perturbaciones y reacciones

	Sistemas lineales	Sistemas no-lineales (advectivos)
Perturbación constante	Reacción constante	Puede generar reacción variable (Lorenz, 1965)
Perturbación variable	Reacción variable	Reacción variable

Fuente: Casparri y Thomasz (2011)

En un sistema lineal, a una perturbación constante le sigue una reacción constante y a una perturbación variable le sigue una reacción variable. No obstante, esta relación no se verifica si el sistema es no lineal. En este último caso, una perturbación constante puede generar una reacción variable. (Lorenz, 1965). Esto corresponde con los sistemas caóticos.

En tanto, el *mainstream* neoclásico esta presuponiendo una visión de acuerdo al paradigma lineal, donde se da una relación regular y proporcional entre la perturbación y la reacción. Dentro de este marco, un sistema que ostente fluctuaciones irregulares es entendido como una secuencia de perturbaciones exógenas irregulares. Por tal motivo, la mayoría de los modelos tradicionales son de forzamiento estocástico, es decir, apelan al uso de una variable aleatoria para generar fluctuaciones. Contrariamente, la visión caótica esgrime que tales fluctuaciones son generadas en

forma endógena, producto de una pequeña perturbación que, en todo caso, puede ser directamente imperceptible. Deben separarse dos cuestiones en lo antedicho:

- En primer lugar, una visión es de naturaleza exógena (las fluctuaciones son generadas solamente por perturbaciones externas) y la otra de naturaleza endógena (el sistema fluctúa en ausencia de perturbaciones).
- En segundo lugar, en un sistema tradicional existe una relación entre la perturbación y la reacción, mientras que en sistema caótico no hay relación, en el sentido que el más mínimo *shock* puede generar una reacción colosal.

La primera aseveración no es muy novedosa, ya que pueden encontrarse sendos trabajos modelando sistemas endógenos (por ejemplo Kaldor, 1940 o Goodwin, 1951; para citar los primeros trabajos). No obstante, la dinámica endógena que se ha modelizado ostenta un comportamiento totalmente regular y predecible, generando ciclos límite de distinta intensidad, con el fin de explicar la existencia regularidades en el ciclo de negocios o en el patrón de crecimiento.

La segunda aseveración es la más controversial. Refiere al interrogante de si en la economía pequeñas medidas pueden generar grandes efectos. O, dicho de otro modo, que la magnitud de la medida no se corresponde en absoluto con la magnitud de los efectos. Además, vale recordar que al margen del efecto mariposa, la dinámica (endógena) de un sistema caótico es totalmente aperiódica, lo cual guarda relación con algunas variables económicas.

Ahora bien, la línea de razonamiento que se plante en este trabajo es la siguiente:

Todas las economías tienen componentes endógenos de mayor o menor incidencia. La decisión de modelar según uno u otro caso debería estar vinculada a la evolución observada de las variables económicas a lo largo del tiempo. No obstante, la visión exógena puede no ser eficiente en dos casos:

- Economías no desarrolladas
- Economías en contextos de crisis

Es en esos dos puntos donde se cree que se encuentra el *locus* de aplicación de la dinámica caótica y compleja. Si bien esto se desarrollará más adelante, cabe aclarar lo siguiente: en este trabajo no se analizará si el sistema económico ostenta o no dinámica endógena; más bien se analizará el fenómeno de *amplificación de shocks*⁵. Es este concepto justamente el que se plantea como riesgo en un sistema complejo.

⁵ Se acepta que si el sistema es un amplificador de *shocks* necesariamente lo hace a través de mecanismos endógenos.

Ahora bien, resta vincular a la dinámica caótica (amplificación de *shocks*) con los ABM's. En términos metodológicos, el planteo es el siguiente: una fluctuación ("una señal") (i) ¿va a ser explicada a través de una perturbación exógena? o (ii) ¿va ser entendida como fruto de la propia dinámica del sistema?

Si se opta por (i) se estará dentro del esquema neoclásico tradicional (DSGE⁶). Si se opta por (ii) se estará dentro de esquema complejo, debiéndose buscar qué es lo que genera endógenamente una fluctuación. Una forma de encontrar una "verdadera explicación" es conceptualmente a través del concepto de emergencia y operativamente a través de un ABM. La expresión "verdadera explicación" corresponde a la aplicación del enfoque generativo (Epstein, 2006).

Vale destacar, que muchos ABM's son capaces de generar dinámica emergente y amplificación de *shocks*.

Resta entonces sintetizar la implicancias de aplicar el enfoque caótico en la modelización en economía. En primer lugar se genera un cambio trascendental en la forma de concebir la economía. De acuerdo a Day (1983) ya no sería necesario buscar en fuerzas exógenas la explicación de cómo cambian los patrones de comportamiento y el por qué resulta tan difícil anticipar eventos futuros a la vista de la experiencia pasada. En segundo lugar, se dan cambios en lo que hace a la efectividad la política económica, la cual dejaría de ser neutral (Freedman, 1971), y donde las implicancias serían las siguientes (Garnica y Thomasz, 2009):

- No existencia de política anticíclica tal como es tradicionalmente concebida, en el sentido que no existe sendero estable hacia el cual redireccionar el sistema
- Fuerte componente endógeno de la dinámica, no siendo factible asociar a las fluctuaciones como una secuencia de perturbaciones exógenas
- Incertidumbre en los resultados de la aplicación de políticas cuantitativas activas, posibilidad de efectos adversos
- Efectos de largo plazo de las políticas activas

1

⁶ *Dynamic Stochastic General Equilibrium Models* (Modelos dinámicos de equilibrio general estocástico).

2.2.3. Síntesis

Se han esbozado tres definiciones en forma simultánea: dinámica compleja, dinámica caótica y sistema complejo. A modo de síntesis, a continuación se delimitan y vinculan tales conceptos.

Según Day (1986), la dinámica compleja es aquella dinámica no-lineal que, sin la intervención de elementos estocásticos, no converge ni a un punto fijo, ni a un ciclo límite ni tampoco diverge. Esto implica, que el sistema necesariamente debe ser no-lineal, aunque no todo sistema no-lineal es complejo, como por ejemplo la función exponencial; también implica que la dinámica esta acotada y es generada en forma endógena.

De acuerdo a definiciones más específicas, una de las particularidades más importantes de la dinámica compleja es la intermitencia, la cual se caracteriza por cambios abruptos en la actividad del sistema, donde se alternan periodos de fluctuaciones de baja intensidad con fluctuaciones explosivas de alta intensidad. En relación a la estabilidad del sistema, la convivencia entre órbitas estables e inestables es un elemento clave en la dinámica compleja. Ergo, un sistema complejo consiste de orden y caos, donde el orden está gobernado por órbitas estables y el caos por órbitas inestables (Chian, 2007).

En suma, la dinámica compleja puede ser definida como la coexistencia entre senderos estables y senderos caóticos, dentro del movimiento endógeno del propio sistema. Este enfoque es el que será tomando en cuenta de aquí en adelante cuando se haga referencia a este tipo de dinámica.

Trivialmente, un sistema complejo sería todo aquel que ostente el tipo de evoluciones descritas, es decir, que al analizar el comportamiento de las trayectorias resultantes se observen periodos de estabilidad (equilibrio) y caos (desequilibrio).

Es por este motivo que a lo largo de la literatura buena parte de las definiciones de complejidad y sistema complejo están en cierta medida vinculadas a la denominada teoría del caos. En efecto, un concepto fuertemente acuñado es "el borde del caos" (*the edge of chaos*). Esto se refiere a lo siguiente: los sistemas muy simples tienden a ser estáticos y aquellos que son hiperactivos son caóticos. Luego, es solamente en el límite entre estos dos comportamientos donde un sistema puede ostentar dinámicas provechosas (Miller y Page, 2007). Esta postura está más vinculada a la definición de complejidad devenida de la física, donde se relaciona a la misma con aquellos sistemas que transmutan del caos al orden y viceversa. Nótese que de acuerdo a esta óptica la complejidad no es ni caos ni orden, sino la transición y/o el diálogo (la dinámica transicional) entre tales estados.

Ahora bien, al inicio de este capítulo se intentó definir qué se entiende por sistema complejo, y la definición no fue dada a partir de las características de la dinámica sino a través de su arquitectura. Es decir, se hablo de agentes heterogéneos, interacción y adaptación (aprendizaje). Esta configuración es la que habitualmente se denomina sistemas complejos adaptativos o sistemas sociales generativos.

Ahora bien, no todo sistema socio-complejo adaptativo va necesariamente a generar dinámica compleja en el sentido de Chian (2007), pero, como se verá más adelante, muchos de esos sistemas terminan generando esa dinámica para ciertas configuraciones de los parámetros. Por ello, una definición menos excluyente es ya citada de Mitchell (2009), donde se asocia a un sistema complejo con la generación de dinámica emergente ("no trivial y auto-organizada").

En suma, a lo largo de este trabajo se mencionarán algunos modelos de agente, y se observarán las dinámicas resultantes. El foco estará puesto en la posibilidad teórica de generación de dinámica emergente y, en el límite caótica, y su correspondencia con el "mundo" económico de acuerdo a algunos casos empíricos seleccionados.

TERCERA PARTE

3. ENFOQUE COMPLEJO EN MODELOS ECONÓMICOS

El enfoque de la complejidad no es tan novedoso en la economía. Autores como Marshall, Kaldor o Hayek han dado de entender que la economía se comporta de una manera compleja: Kaldor (1940) utilizó funciones de inversión no-lineales para generar ciclos endógenos, y Hayek (1967) sostuvo que la cantidad de variables necesarias para describir un modelo es mucho mayor en sistemas sociales o animados que en naturales o físicos y, por lo tanto, estos sistemas sociales —como la economía— son más complejos.

Sin embargo, esos precedentes no se cristalizaron en resultados significativos ni llegaron a manifestarse en el "mainstream" económico. Más bien, muchos estudios abordaron el estudio de la dinámica *compleja* desde los modelos clásicos, es decir, sin resignar el núcleo duro de la modelización neoclásica. En este sentido, muchas líneas de investigación se concentraron en el estudio de cómo es posible generar dinámica caótica al interior de los modelos tradicionales. A continuación se presenta una breve síntesis de dicho enfoque.

3.1. La dinámica caótica en los modelos clásicos

El estudio de la dinámica caótica en los modelos neoclásicos es extensa y diversa, siendo los autores más citados: Grandmont (1985), utilizó el supuesto de expectativas racionales en el modelo de generaciones superpuestas (*Overlapping generations: OLG*) bajo un contexto de *laissez-faire*, para demostrar que ciclos económicos caóticos pueden ser generados endógenamente por la macroeconomía; Jullien (1988), expresó la posible presencia de comportamiento dinámico es un modelo de OLG con dos sectores con acumulación de capital; Matsuyama (1991) señaló la presencia de comportamiento dinámico en un modelo óptimo de horizonte infinito con mercados completos, cuando los balances de dinero real entran directamente en las funciones de utilidad de los agentes; y, Puu (1997) modificó el modelo de Goodwin (1951) dándole a la función del acelerador una forma cúbica.

El modelo de crecimiento económico neoclásico por excelencia es el modelo de Solow (1956), quien también ha tenido a varios autores contribuyendo con la búsqueda de "caos":

Robert Day (1982), utilizó la teoría de acumulación de capital neoclásica para demostrar cómo comportamientos complejos pueden emerger de estructuras económicas simples. Cuando se tiene suficientes no-linealidades y un *lag* de producción, la simple interacción de la propensión al ahorro y la productividad del capital pueden llevar a ciclos de crecimiento económico que fluctúan sin converger a ciclos de periodicidad regular.

Khan & Mitra (2004), analizaron la presencia de caos topológico en un contexto simple bajo el supuesto de convergencia monótona de los programas de optimización, en un modelo de dos sectores con inversión irreversible basado en el modelo de Robinson, Solow y Srinivasan. Los resultados se basan en la teoría de la turbulencia en sistemas no-lineales dinámicos y en la existencia de una función única de política óptima continua para cada stock inicial cuando las utilidades futuras son descontadas por un parámetro menor que el del ratio de capital-trabajo.

Flaschel & Proaño (2008), consideraron el tema de la no-equivalencia de periodo y el análisis de tiempo continuo en la teoría macroeconómica, y sus implicancias ante la existencia de dinámica caótica en macroeconomía empírica. Demuestran cómo se cumple en el modelo de Solow el precepto metodológico de que la representación de periodos y tiempos continuos de la misma macroestructura deben dar los mismos resultados cuantitativos, en particular que los resultados del periodo analizado no dependen de la longitud del mismo. El comportamiento caótico resulta de un modelo macroeconómico continuo asintóticamente estable cuando es reformulado como un modelo discreto con periodos de larga duración.

Palmisani (2008), revisó las condiciones bajo las cuales se encuentra presencia de comportamiento caótico en modelos discretos tipo Solow. Considera como determinantes a la constancia de la tasa de ahorro promedio y a la curvatura de la función de producción que representa el grado de sustitución entre el capital y el trabajo; cuanto menor sea el grado de sustitución, mayor es la probabilidad de comportamiento complejo.

3.1.1. Caos en modelos económicos

A continuación se enumeran algunos ejemplos de cómo al introducir algunas modificaciones a ciertos modelos clásicos puede arribarse a formas funcionales loables de ostentar dinámica caótica. Los modelos seleccionados a continuación fueron sintetizados en base a Barnett *et al* (1997).

3.1.1.1. Rational Choice

Los modelos de "rational choice" pueden derivar en evoluciones aperiódicas cuando las preferencias de los agentes dependen de la experiencia pasada, según la siguiente ecuación:

$$\alpha_t = r x_{t-1} y_{t-1}$$

Donde r_t es el parámetro de dependencia del pasado. Reemplazando en la ecuación de demanda del bien x , se obtiene la siguiente expresión:

$$x_t = \frac{rI}{p_x p_y} x_{t-1} (I - p_x x_{t-1})$$

Nótese que si $p_x = p_y = I = 1$, la expresión se reduce a la ecuación logística (May, 1976). Ello implica que según sea el valor del parámetro de dependencia del pasado, pueden obtenerse evoluciones inestables y totalmente irregulares.

3.1.1.2. Modelos de Crecimiento: Solow

Partiendo de la ecuación fundamental del modelo:

$$(1 + v)k_{t+1} = sf(k_t)$$

Donde k es el capital por trabajador, f es una función neoclásica de producción y " v " y " s " son las tasas de crecimiento de la población y del ahorro, respectivamente. Se introduce al modelo factor de contaminación que reduce la productividad, de acuerdo a la siguiente función:

$$f(k_t) = Bk_t^\alpha (\zeta - k_t)^\gamma$$

Donde $k_t \leq \zeta = \text{constante}$ (actúa como saturación del capital por trabajador) y $(\zeta - k_t)^\gamma$ refleja el efecto de la contaminación sobre el producto per cápita. Al incrementarse k_t , la contaminación también aumenta y se genera menor cantidad de producto con un determinado stock de capital que en el modelo original. Con dicha modificación la ecuación fundamental del modelo deriva a la siguiente expresión:

$$(1 + v)k_{t+1} = sBk_t^\alpha (\zeta - k_t)^\gamma$$

Si $B = \gamma = \xi = 1$, la expresión anterior se reduce a:

$$k_{t+1} = rk_t(1 - k_t)$$

La cual es la forma tradicional de la ecuación logística (May, 1976). Al igual que en el caso anterior, para ciertos valores del parámetro r pueden observarse comportamientos aperiódicos.

3.1.1.3. Modelos de crecimiento: Agente representativo

En este caso se analiza un modelo de crecimiento optimizador de agentes representativos y con dinero.

Cada agente (dinastías) maximiza su utilidad intertemporal de acuerdo a:

$$\sum_{t=0}^{\infty} \beta^t u(c_t, m_t)$$

La restricción presupuestaria que enfrenta cada agente es:

$$P_t(m_t + c_t) = P_t y + H_t + P_{t-1} m_{t-1}$$

Asumiendo utilidad instantánea y aditiva, los puntos de equilibrio del modelo (puntos fijos) surgen de la siguiente expresión:

$$m_{t+1} u_c(y, m_{t+1}) = \frac{1 + \mu}{\beta} [u_c(y, m_t) - u_m(y, m_t)] m_t$$

Levantando el supuesto de separabilidad y en su lugar considerando:

$$u(c, m) = \frac{(c^{1/2} m^{1/2})^{1-\sigma}}{1-\sigma} \quad \sigma > 0, \sigma \neq 1$$

Donde σ es la inversa de la elasticidad de sustitución intertemporal entre los valores presentes y futuros del *commodity* agregado $(cm)^{1/2}$. De este modo la ecuación del modelo se reduce a:

$$x_{t+1}^\alpha = \frac{1+\mu}{\beta} x_t^\alpha (1-x_t)$$

La anterior ecuación tiene un único *steady state*:

$$\bar{x} = 1 - \frac{\beta}{1+\mu}$$

Introduciendo la condición de *steady state* dentro de la ecuación de comportamiento del modelo, se obtiene:

$$x_{t+1} = x_t \left(\frac{1-x_t}{1-\bar{x}} \right)^{1/\alpha}$$

Nótese que si $\alpha = 1$ la expresión se reduce al mapa logístico, pudiendo generarse ciclos aperiódicos.

3.1.1.4. Mitad de camino

En síntesis, se ha verificado que según ciertos valores particulares que tomen los parámetros, es posible generar evoluciones no periódicas (tal vez caóticas) incluso en modelos económicos clásicos. No obstante, la discusión debe centrarse en si tales valores son económicamente posibles, es decir, interpretables en la lógica de la economía; y más allá, si realmente se conciben con los hechos estilizados de los fenómenos económicos.

No obstante, las aplicaciones presentadas no explotan la potencialidad de los sistemas complejos. Ninguno de los modelos presentados presentan agentes heterogéneos, interacción con el entorno ni adaptación. Lejos de generar comportamientos emergentes, este tipo de modelos parecen armados aplicando el principio de la "ingeniería inversa", es decir, parecen ser armados a medida para lograr arribar a una

forma funcional que ostente dinámica caótica, pero sin resignar la estructura fundamental del modelo.

En otras palabras, los casos enunciados son modelos tradicionales que bajo ciertas condiciones ostentan dinámica caótica, pero no son modelos complejos, al menos en el sentido definido en este trabajo.

En el apartado siguiente, se sintetizará una propuesta alternativa a la modelización clásica, fundamentando la aplicación de la modelización compleja al análisis económico.

3.2. Sistemas complejos adaptativos en economía

Econophysics, in fact, had a close proximity to attempts at allowing for heterogeneous interacting agents in economic models. It is in this strongly increasing segment of academic economics where complexity theory and econophysics have made the biggest impact.

Thomasz Lux, Applications of Statistical Physics in Finance and Economics – University of Kiel, Germany – June 22, 2006.

Desde el punto de vista fenomenológico, los sistemas económicos pueden ser entendidos como entes altamente complejos, en los cuales interactúan en forma simultánea infinidad de variables mutuamente dependientes, donde toda acción – individual o conjunta, planificada o no planificada, racional o irracional, etc.– tiene impactos –de mayor o menor magnitud– en todas las partes, nodos o subsistemas que componen el entramado, estructura o red de interacción del sistema económico-social en su conjunto.

Ahora bien, a los fines de formalizar y fundamentar los impactos antes mencionados, Holland (1988) enumera seis características que resumen aspectos que distinguen a los sistemas económicos como complejos (o al menos con algunos componentes de complejidad respecto a la visión tradicional). Tales características son las siguientes:

- **Interacción dispersa:** Lo que sucede en la economía está determinado por la interacción de muchos agentes que se encuentran dispersos, generalmente heterogéneos, y que actúan en forma paralela. La acción de un agente dado

depende de las acciones de anticipación de un conjunto reducido de otros agentes y del estado agregado que tales agentes co-crean. Las decisiones no se toman en función del conocimiento que el agente tenga del modelo, sino de su lectura y percepción de la situación contextual, influenciada por él mismo y por el resto de los agentes. El individuo puede influir en forma dinámica en el devenir del fenómeno.

- **No existe controlador global o planificador central:** Ninguna entidad global controla las interacciones. En su lugar, la regulación es provista por mecanismo de competencia y coordinación entre agentes. Las actividades económicas son mediadas por instituciones legales, asignación de roles y *shifting associations*. Tampoco existe un competidor universal, es decir, un solo agente que pueda aprovechar todas las oportunidades de la economía. Las instituciones o asignación de roles pueden ser formales o informales, y pueden cambiar a lo largo del tiempo. La creación de asociaciones temporarias son una característica de la relaciones entre agentes y meta-agentes en contextos complejos.
- **Organización jerárquica trasversal:** La economía tiene muchos niveles de organización e interacción. Comportamientos, acciones y estrategias de unidades de un cierto nivel sirven de basamento para la construcción de unidades en un próximo nivel más elevado. La organización como un todo es más que jerárquica, con muchas formas de interacción (asociaciones, canales de comunicación) entre niveles. En este marco, las relaciones entre agentes tienen dos cualidades que no son fáciles de describir en el lenguaje ordinario: son recursivas, en el sentido que muchas relaciones están enmarcadas por otras (como una empresa es compuesta por divisiones y departamentos), pero no son jerárquicas, en el sentido que un agente puede participar en todo un conjunto de relaciones *cross-cutting*, sin ningún orden estricto (un técnico puede estar empleado en una compañía, participar de actividades en la Asociación Técnica Profesional y trabajar en forma independiente con un colega en el diseño de un producto)⁷. Dicho de otro modo, los agentes revisten diferentes jerarquías en el sentido que existen agentes y meta-agentes. Para citar otro ejemplo, en el mercado financiero puede estar operando un inversor particular interactuando en forma personal frente al mercado, pero ese mismo agente puede poseer parte de sus activos invertidos en un fondo común de inversión que también está operando en el mercado y en ese mismo momento. Asimismo, ese fondo común de inversión a su vez puede formar parte de la cartera de una institución más elevada (por ejemplo un inversor institucional). La cuestión central es que estos tres niveles de red están estrechamente vinculados, unos forman parte de otros, pero al mismo tiempo

⁷ Lane y Maxfield (1997), en *"The Economy as an Evolving Complex System II (Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity Proceedings)*.

tienen una existencia en sí misma, es decir, siguen pautas y reglas de inversión totalmente distintas las unas de las otras.

- **Adaptación continua:** Comportamientos, acciones, estrategias y productos son revisados en forma continua a medida que los agentes individuales acumulan experiencia – el sistema se adapta en forma permanente. Los mecanismos de adaptación constituyen un elemento fundamental en los sistemas complejos, y podría llegar a tomarse casi como definición de sistema complejo, al menos en el ámbito económico. En el caso de los modelos de agentes heterogéneos en el ámbito financiero y del crecimiento económico, lo que realmente dinamiza al modelo es la introducción de un mecanismo adaptativo, el cual permitía revisar el mecanismo de predicción de acuerdo al error de pronóstico cometido.
- **Novedad continua:** Nuevos mercados, nuevas tecnologías y nuevas instituciones crean nuevos nichos en forma incesante. Las relaciones recursivas entre agentes, las asociaciones y asignación de roles temporales dan la posibilidad de generar *feedbacks* positivos que son explotados y reproducidos de manera continua.
- **Dinámica fuera del equilibrio:** Dado que nuevos nichos, nuevas potencialidades y nuevas oportunidades surgen en forma continua, la economía opera lejos de puntos óptimos o equilibrios globales. Las mejoras son posibles y de hecho ocurren en forma regular. Además, los mecanismos adaptativos generan que en muchos casos el estado parcialmente estacionario alcanzado se sitúe por debajo del óptimo, dado la existencia de otros factores de influencia (“no siempre producir lo máximo posible es lo mejor”). En muchos casos, las reglas heurísticas de adaptación generan patrones u órdenes espontáneos, que no necesariamente son óptimos. Además, la visión del equilibrio no es usualmente un buen predictor de comportamiento: los limitados resultados de tales modelos pueden ser extremadamente sensibles a la especificación de las condiciones iniciales (caos), sugiriendo que el análisis de equilibrio no es un buen sustituto para la suplir la carencia de conocimiento de otros aspectos de la economía (Samuelson, 2006).

En síntesis, los puntos listados son algunos de los fundamentos y conceptos que sustentan la modelización de la economía como un sistema complejo. Por otro lado, es importante destacar que no es necesario que todas las dimensiones antes mencionadas tengan que estar presentes para que un determinado modelo económico sea considerado complejo. En algunos casos, con la sola inclusión de alguna de ellas basta para introducir “complejidad”. Por ejemplo, en algunos de los modelos que serán presentados en este trabajo, solamente se introduce una heterogeneidad en el esquema de formación de expectativas (“agentes heterogéneos”) y un simple mecanismo de adaptación. En otro, simplemente se introduce en la decisión de los

agentes la influencia del entorno. No obstante, configuran casos emblemáticos de sistema complejo en el marco de los ya mencionados modelos de agente.

Por otro lado, un aspecto fundamental de la visión de la economía como un sistema complejo adaptativo es incorporar el pluralismo cognitivo, a diferencia del *mainstream* neoclásico que asumía, por un lado, un solo mecanismo de formación de expectativas (generalmente expectativas racionales) y por otro, la existencia de conocimiento común (todos los agentes tienen acceso a toda la información relevante y en la misma magnitud). La visión compleja incorpora la visión de los "modelos mentales": los agentes habitan un mundo que deben interpretar en forma cognitiva, enfrentándose a una realidad que está complejizada por la presencia de las acciones de otros agentes que está en permanente cambio. La interpretación y la lectura heterogénea de los fenómenos por parte de cada agente (en base a su "modelo mental") es un aspecto crucial dentro del enfoque complejo, caracterizándose por la presencia fenomenológica de estructuras emergentes y la ambigüedad cognitiva (Arthur, 1999).

Vale destacar que una de las formas de incorporar el pluralismo cognitivo antes mencionado a los sistemas económicos, es mediante los modelos de agente, básicamente a través de los dos casos sintetizados en este trabajo⁸, o una combinación de ambos. De esta forma se incorpora no solamente la heterogeneidad en el esquema de formación de expectativas (pluralismo cognitivo), sino también la influencia del entorno en los cursos de acción (conocimiento segmentado).

De acuerdo a lo anterior, el hecho de que el énfasis este puesto en la formación de estructuras más que en su existencia predefinida, hace que los problemas vinculados a la predicción sean muy diferentes (Arthur, 1999).

En síntesis, el concepto de complejidad en sistemas económicos esta actualmente más vinculado a una propuesta alternativa al *mainstream* neoclásico, el cual hace uso de medios computacionales para emular comportamientos emergentes, aplicando modelos de agente y redes no lineales adaptativas. Las diferencias conceptuales respecto a la modelización clásica se resumen en el cuadro siguiente.

⁸ La ovación de pie (Schelling 1978; Miller and Page 2004) y el Modelo de crecimiento con agentes heterogéneos (Schuschny, 2001).

Tabla N° 4: Resumen comparativo del enfoque clásico y enfoque complejo

ENFOQUE CLÁSICO	ENFOQUE COMPLEJO – ADAPTATIVO
Agentes optimizadores – Racionales – Conocimiento común	Racionalidad acotada – Métodos heurísticos – pluralismo cognitivo
Agente representativo	Agentes heterogéneos
Resultado (dinámica global) por agregación	Resultado (dinámica global) por interacción
Soluciones consistentes: equilibrio general, parcial, de Nash	Desequilibrios, equilibrios transitorios, emergencia
Sendero óptimo de Pareto	Sendero sub-óptimo – posibilidad de mejora
Interacción extrema: uno con todos (mercado) o todos con todos (juegos)	Estructura de red – Interacción en diversos niveles jerárquicos
Algoritmos simples	Algoritmos más sofisticados
Resolución algebraica y/o análisis matemático	Reducción por simulación numérica
Supuestos	Supuestos

Fuente: Elaboración propia

En relación al impacto sobre los lineamientos de política económica, la visión de la complejidad esta contrapuesta a la del *laisse faire* (el sistema no se autorregula en forma óptima) pero también a la de la intervención estructural. Más bien postula la pro-acción no lineal, los impulsos pequeños que en ciertos contextos pueden generar grandes resultados, o viceversa, la identificación que en ciertos contextos ciertas políticas cuantitativas (aún muy expansivas) no surtirán los efectos tradicionalmente esperados. En este sentido, bajo el enfoque complejos, los *policy makers* deberían evitar los dos extremos: querer alcanzar coercitivamente un resultado o directamente esperar a que el sistema se auto-regule. Por el contrario, el foco debería estar puesto en ubicar el sendero sobre estructuras que puedan crecer y emerger en forma espontánea. Ni una mano pesada, ni una mano invisible: una mano que acompañe (Arthur, 1999).

3.2.1. Síntesis

Como fue dicho al inicio de este capítulo, casi todas las escuelas del pensamiento económico han reconocido la inherente complejidad del sistema económico. Sin embargo, esos precedentes no cristalizaron en resultados significativos ni llegaron a manifestarse en el "mainstream" económico, en parte debido a que los economistas de entonces carecían de una herramienta formal adecuada para enfrentar rigurosamente el desafío de la complejidad.

Según Leijonhufvud (1993) esa herramienta es la economía computacional, que posibilita el estudio de sistemas dinámicos complejos sin sobresimplificar su estructura, sin reducir el sistema entero a un problema de optimización único del agente representativo. En cambio, la teoría económica ha partido tradicionalmente del postulado de que los agentes actuarán siempre de la manera más apropiada a la situación, eliminando la posibilidad de racionalidad limitada con la esperanza de que la racionalidad ilimitada arroje una predicción única dada la situación externa. Pero este axioma impide la formulación de preguntas interesantes acerca de cómo las decisiones individuales se toman realmente.

El enfoque tradicional adolece además de problemas internos: puede demostrarse que algunas decisiones no son computables (decidibles) y que los modelos dinámicos de equilibrio general pueden alcanzar múltiples equilibrios. Siguiendo a Rosser (1999), la más evidente implicación del estudio de la complejidad sea probablemente que el presupuesto de expectativas racionales rara vez se sostiene, por una lado porque la existencia del efecto mariposa en las dinámicas caóticas impide que los agentes sean capaces de formar expectativas racionales y, aun en el caso de dinámicas complejas no caóticas, la posibilidad de convergencia a múltiples equilibrios o de divergencia implica que ni las expectativas racionales ni la compensación perfecta del mercado sean presupuestos realistas.

El estudio de la economía como sistema complejo se puede entender entonces como una crítica fundamental a los modelos clásicos basados en el concepto del agente representativo y el supuesto de las expectativas racionales, crítica elegantemente expresada por Leijonhufvud (1993): "[El estudio de la economía como sistema complejo] describe agentes creíblemente simples que se enfrentan a situaciones increíblemente complejas, mientras la economía neoclásica describe el comportamiento de agentes increíblemente inteligentes ante situaciones inverosíblemente simples".

Ahora bien, ¿qué forma tienen y qué resultados se observan al modelar un sistema económico mediante reglas de comportamiento "simples" que generan "dinámicas complejas"? Para responder al interrogante, a continuación se sintetizan algunos modelos de agentes, sobre los cuales se realizarán las simulaciones pertinentes.

3.2.2. Modelos de Agente en Economía

En este apartado se resumirán dos modelos de agente donde cada uno en particular incorpora un aspecto fundamental: la adaptación por un lado y la influencia del contexto por otro.

El primer modelo es un caso de agentes heterogéneos donde la posibilidad de generar dinámica compleja es fruto de la combinación de agentes con diferentes formas de comportamiento, los "fundamentalistas" y los "adaptativos". La mezcla entre ambos grupos (la posibilidad que puedan cambiar en forma endógena su comportamiento) puede generar fluctuaciones endógenas interesantes sin la intervención de componentes estocásticos.

3.2.2.1. Modelo de crecimiento con agentes heterogéneos⁹

Se plantea un modelo determinista, donde el comportamiento de la variable relevante depende de la expectativa acerca del futuro de la misma:

$$y_t = f(y_{t+1}^e; \theta)$$

Siendo:

- y_{t+1}^e : el valor medio de la variable y que los agentes esperan en t que se realice en el período $t+1$
- θ : el vector de parámetros del modelo

L

⁹ El modelo puede consultarse en Schuschny (2001).

Se supone que $f(x)$ posee un equilibrio de expectativas racionales, único y estacionario. Esto es, que $y^* = f(y^*; \theta)$ es un punto fijo estable.

Definida la forma funcional del modelo, y sus supuestos, se introduce una heterogeneidad en el mecanismo de formación de expectativas.

- Por un lado están los agentes racionales, que tiene perfecto conocimiento acerca de la evolución del modelo y formulan sus expectativas con previsión perfecta:

$$y_{t+1}^{1,e} = y_{t+1}$$

- Por el otro están los agente "ruidosos", quienes adaptan sus expectativas extrapolando los valores que la variable fue adquiriendo en períodos anteriores:

$$y_{t+1}^{2,e} = g(y_t, y_{t-1}, y_{t-2}, y_{t-3}, \dots, \mathcal{G})$$

Donde \mathcal{G} representa al conjunto de parámetros de este esquema de formación de expectativas.

Para combinar la interacción de ambos grupos de agentes se construye una ecuación que representa la expectativa agregada de la economía, definida como el promedio del valor de cada expectativa ponderada por el número de agentes que sigue una u otra estrategia:

$$y_{t+1}^e = n_1^1 y_{t+1}^{1,e} + n_2^2 y_{t+1}^{2,e} = n_1^1 y_{t+1} + n_2^2 g(y_t, y_{t-1}, y_{t-2}, y_{t-3}, \dots, \mathcal{G})$$

Ahora bien, si se reemplaza en la ecuación de movimiento del modelo, se arriba a la siguiente expresión:

$$y_t = f\left(n_1^1 y_{t+1} + n_2^2 g(y_t, y_{t-1}, y_{t-2}, y_{t-3}, \dots, \mathcal{G}); \theta\right)$$

No obstante, hasta el momento, la expresión anterior no genera dinámicas complejas. Esto, definir exógenamente la proporción de agentes racionales y adaptativos no aporta demasiado en términos de cualidades dinámicas de modelización. Es decir, para observar dinámicas complejas es necesario perturbar el modelo mediante *shocks* exógenos, en este caso, introducir cambios en las proporciones de racionales y adaptativos.

Luego, el eje de la cuestión radica en endogenizar la distribución del esquema de formación de expectativas entre ambos grupos, es decir, determinar las proporciones de cada uno. Para ello, Schuschny (2001), desarrolla una forma aplicando el "Principio de Máxima Entropía". En primer lugar, se introducen costos asociados al uso de cada estrategia. En palabras del autor:

- En el caso de los racionales, *como se tratara de una previsión informada, el agente debe incurrir en el pago de un costo C_1 necesario para conocer con precisión el valor futuro de la variable endógena en cuestión. Obviamente, su magnitud esta asociada a los costos necesarios para obtener información precisa y aprender la verdadera estructura del sistema sobre el cual el agente esta formulando sus planes. Como la previsión es perfecta, no se cometen errores de pronóstico, por lo tanto la "desutilidad" de esta estrategia se mide únicamente por el pago de ese costo fijo: $U_i^1 = C_1$.*
- En lo que respecta a los adaptativos, *como es posible que se cometan errores de previsión, la "desutilidad" de este mecanismo se define en términos del error en la previsión al que alternativamente se le puede sumar un costo C_2 , que puede depender del grado de sofisticación del método, entonces: $U_i^2 = (y_t - g(y_t, y_{t-1}, y_{t-2}, y_{t-3}, \dots; \theta))^2 + C_2$.*

Siguiendo nuevamente al autor, *para poder determinar la proporción de agentes que siguen las expectativas racionales respecto de los que las formulan con el segundo modelo utilizamos el Principio de Máxima Entropía. Esto es equivalente a considerar al conjunto de todos los agentes como un grupo que posee la distribución de creencias más azarosa compatible con un determinado nivel medio de "desutilidad" $U^1 = U_0$. Esta representación supone que existe un parámetro de control exógeno $\beta = \beta(U_0)$ y que se asocia a la dispersión que existe sobre la distribución de las creencias y en termodinámica estadística tiene la misma interpretación que la inversa de la "temperatura".*

De esta forma, se determinan las proporciones de racionales y adaptativos en función de las "desutilidades" de cada estrategia y del parámetro β :

$$n_i^1 = \frac{e^{-\beta U_i^1}}{Z_i}, \quad n_i^2 = \frac{e^{-\beta U_i^2}}{Z_i}$$

Siendo $\frac{1}{Z_i}$ el factor de normalización de la distribución: $Z_i = e^{-\beta U_i^1} + e^{-\beta U_i^2}$

Para simplificar la expresión se define una nueva variable endógena que grafica la polarización del sistema:

$$m_i = n_i^1 - n_i^2$$

Nótese que si $m_i = 1$ todos los agentes siguen las expectativas racionales, mientras que si $m_i = -1$ todos están optando por la estrategia adaptativa.

Despejando, se obtienen los respectivos ponderadores en función de m_i :

$$n_i^1 = \frac{1+m_i}{2}, \quad n_i^2 = \frac{1-m_i}{2}$$

Por otra parte, aplicando las formas funcionales de n_i^j , se obtiene:

$$m_i = \tanh\left(\frac{\beta}{2}(U_i^2 - U_i^1)\right)$$

De esta forma, quedan definidas en forma endógena las proporciones de agentes que seguirán uno u otro esquema de formación de expectativas. Ello genera un sistema recursivo que determina los valores de la variable y_t , la cual depende, justamente, del esquema de formación de expectativas y de por ende de la dinámica de determinación de las proporciones de racionales y adaptativos.

Expresando nuevamente la ecuación de movimiento fundamental:

$$y_t = f\left(\frac{1+m_t}{2}y_{t+1} + \frac{1-m_t}{2}g(y_t, y_{t-1}, y_{t-2}, y_{t-3}, \dots; \theta); \theta\right)$$

Que, según Schusny (2001), dada la alta no linealidad de m_t , pueden generarse comportamientos periódicos, cuasi-periódicos y caóticos.

3.2.2.1.1. Simulación

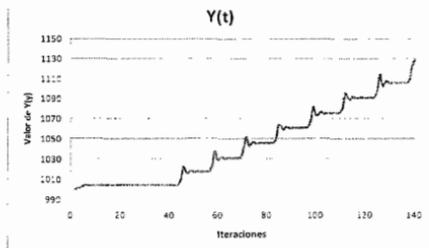
A continuación se presenta un caso de las tantas simulaciones que pueden realizarse con este modelo. Las características de la trayectoria dependen, entre otras cosas, de las formas funcionales que se seleccionen para racionales y adaptativos.

Para hacer una primer simulación se toma un enfoque muy simplificado:

- Para los fundamentalistas se toma una función de producción lineal
- Para los chartistas se toma el promedio simple de los últimos tres períodos
- No se incorpora ningún elemento estocástico

En el gráfico siguiente se presenta la trayectoria resultante iterar el modelo 140 veces. Nótese que se genera una trayectoria con tendencia creciente (producto de la función lineal) pero con una forma de crecimiento bastante peculiar (tal vez estilo *'stop and go'*), alternado una secuencia de crecimiento explosivo y estabilización (estilo *'overshooting'*).

Gráfico N°1: Evolución del sendero *stop and go*



Fuente: Elaboración propia

Un segundo ensayo se realiza incorporando una función de producto con previsión perfecta y convergente tal como lo establece el modelo original. En este caso la simulación resultante converge hacia un punto fijo. No obstante, resultan interesantes dos aspectos:

- La trayectoria de llegada al punto fijo es fluctuante, observándose saltos y retracciones.
- En el sendero de equilibrio, todos los agentes siguen la estrategia adaptativa. Es decir, lo que en principio parecería ser un equilibrio signado por la componente fundamentalista, en los hechos no lo es.

Gráfico N°2: Evolución del sendero de equilibrio



Fuente: Elaboración propia

Ahora bien, si al mismo modelo se le incorpora una variable aleatoria (normal con media cero y desvío unitario) y se realiza una modificación en el algoritmo de adaptación (en lugar de acotarlo a una forma arcotangencial se lo libera a una forma tangencial), se observa lo siguiente:

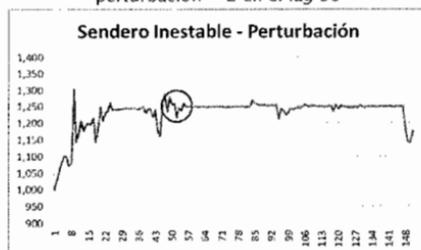
Gráfico N°3: Sendero del modelo tangencial, con componente estocástica, Beta = 1.5



Fuente: Elaboración propia

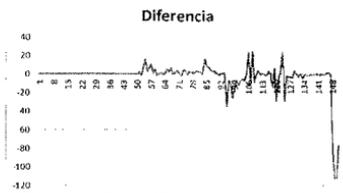
En primer lugar el modelo ostenta mayores fluctuaciones, pero por efecto de la componente estocástica. En cuanto a su trayectoria, el mismo se estabiliza en torno a un valor puntual. No obstante, el sendero presenta rasgos de inestabilidad. Esto se verifica en la simulación siguiente, donde se impone una perturbación exógena a partir de la iteración n°50. Al graficar la diferencia entre la serie origina y la perturbada, se observa como el *shock* tiende a persistir e incrementarse a medida que el sistema evoluciona, al menos dentro del rango evaluado.

Gráfico N°4: Sendero del modelo tangencial, con componente estocástica, Beta = 1.5, perturbación = 2 en el lag 50



Fuente: Elaboración propia

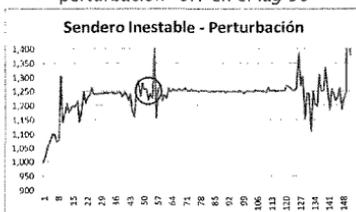
Gráfico N°5: Evolución de la perturbación



Fuente: Elaboración propia

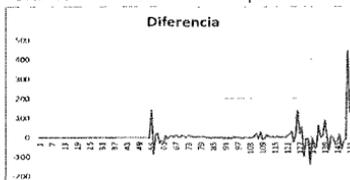
Ahora bien, frente a esto cabe la hipótesis de si el modelo presentado, para esa configuración de parámetros ostenta dinámica caótica. Si bien para dar una respuesta determinante se podría ensayar un testeo del exponente de Lyapunov, en este caso nos limitaremos a evaluar en forma gráfica la incidencia de un *shock* muy pequeño. A continuación se replica el mismo ejercicio anterior pero imponiendo un shock de valor 0.1.

Gráfico N°6: Sendero del modelo tangencial, con componente estocástica, Beta = 1.5, perturbación=0.1 en el lag 50



Fuente: Elaboración propia

Gráfico N°7: Evolución de la perturbación



Fuente: Elaboración propia

Nótese que en primer lugar el *shock* genera una fuerte fluctuación, luego virtualmente desaparece pero vuelve a manifestarse en forma colosal unos períodos mas tarde. En un determinado momento, la perturbación alcanza los 400 puntos, frente a un valor de 0.1 de *shock* inicial. Esto es evidencia favor de la existencia de dinámica caótica.

En suma, con este modelo simple (dos agentes y un mecanismo de adaptación) intentó mostrarse la posibilidad de generar dinámica emergente, senderos inestables e incluso caos. No es el objetivo aún evaluar la correspondencia entre este modelo y los fenómenos estudiados, ni mucho menos la calidad de su microfundamentación o la gama de resultados frente al cambio de parámetros. Este caso tiene como objetivo mostrar la arquitectura de este tipo de modelos y analizar la gran variedad de posibilidades de trayectorias resultantes, muchas de las cuales se apartan del tradicional *steady state*.

En el punto siguiente se presenta otro modelo, donde se impone otra de las características vinculadas a la modelización compleja: la influencia del entorno.

3.2.2.2. Modelo de Crecimiento con Market Sentiment

Otro modelo interesante es el elaborado por Pita, Hauber y Thomasz (2011), sobre la base de Cazian (2001). Este modelo se basa en fundamentos de un sistema Keynesiano, pero incorpora como aspecto fundamental la influencia del contexto a través de una variable denominada "sentimiento del mercado". Esto refleja el optimismo o pesimismo predominante de los agentes respecto de la evolución de la economía, y su influencia sobre las decisiones de inversión y consumo tomadas en un marco de incertidumbre y racionalidad acotada, que configurarán la dinámica endógena del ciclo económico.

Las ecuaciones fundamentales del modelo son las siguientes:

El sentimiento de mercado

$$O_{t+1} = O_t + \begin{cases} 1 & \text{con probabilidad } \delta \frac{I_t}{N} + \epsilon \frac{I_t}{N} \\ 1 & \text{con probabilidad } \delta \frac{I_t}{N-1} + \epsilon \frac{I_t}{N} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (1)$$

La inversión agregada

$$I_t = \Phi I_{t-1} + \lambda \left(\frac{\hat{p}_t}{r} - 1 \right) \quad (2)$$

$$\hat{p}_t = \frac{O_t}{N} (1 + \eta) \hat{p}_{t-1} + \frac{P_t}{N} (1 - \eta) \hat{p}_{t-1} \quad (3)$$

$$\hat{p}_{t-1} = \frac{\alpha Y_{t-1}}{I_{t-1}} \quad (4)$$

La tasa de interés

$$r = \frac{\mu}{\theta} Y_t - \frac{1}{\theta} M - v_t \quad (5)$$

$$v_t = v \frac{O_t}{N} + \frac{P_t}{N} \quad (6)$$

El consumo agregado

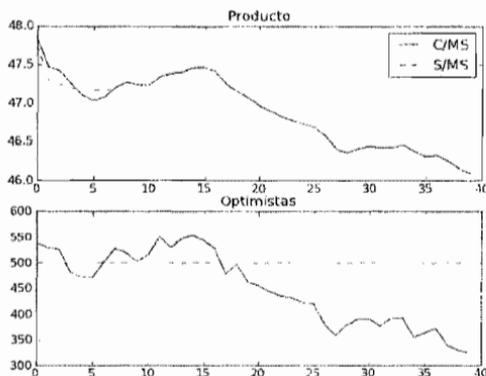
$$C_t = cM_t + \bar{C} \quad (7)$$

La demanda agregada

$$DA_t = C_t + I_t \quad (8)$$

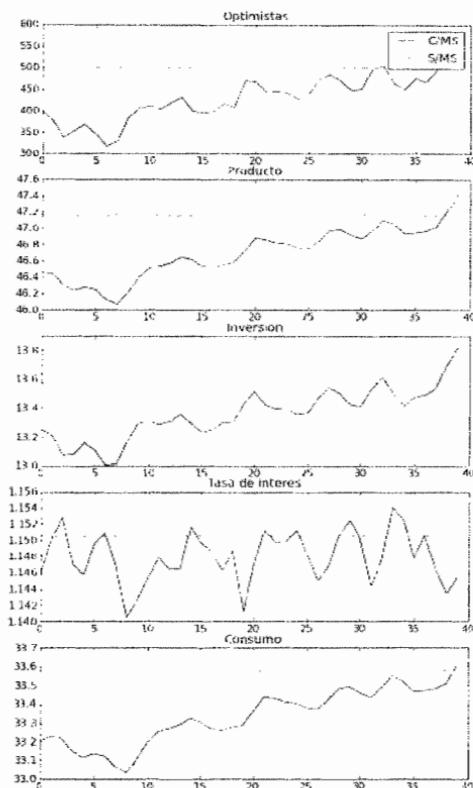
Los resultados de la simulación del modelo por iteración se plasman en los gráficos siguientes:

Gráfico N°8: Dinámica del producto con y sin sentimiento de mercado (C/MS y S/MS, respetivamente).



Fuente: Pita, Hauber y Thomasz (2011)

Gráfico N°9: Evolución simultánea del sentimiento del mercado, el producto, la inversión, la tasa de interés y el consumo



Fuente: Pita, Hauber y Thomasz (2011)

3.2.2.2.1. Conclusiones

Los resultados de la simulación del modelo de agentes muestran que es teóricamente posible generar las oscilaciones del ciclo del negocio si se limita la racionalidad de los agentes, es decir, si éstos mantienen expectativas influenciadas por el sentimiento del

mercado. El sentimiento del mercado muestra una alta correlación con la evolución del producto y es una causa de fluctuaciones en la economía.

Por otro lado, cabe destacar que ni el mismo sentimiento del mercado ni ninguna otra variable "explota", sino que todas oscilan irregularmente alrededor del valor de equilibrio que existiría sin la incidencia del sentimiento de mercado. Tomando en serio la incertidumbre que enfrentan los agentes y las expectativas imperfectas que estos forman, sensibles a la opinión de los demás, se llega a una microfundamentación keynesiana que es suficiente para modelar la dinámica compleja inexplicada por los modelos económicos clásicos.

3.2.3. Síntesis

En esta sección se plasmaron los fundamentos para la aplicación de los sistemas complejos a la modelización en economía. Se planteó que esta aplicación no conlleva solamente un cambio operacional, sino que propone levantar el "núcleo duro" de la teoría neoclásica a través de los agentes heterogéneos y el pluralismo cognitivo.

Por último, se presentaron dos modelos que, no obstante su simpleza, generan trayectorias no predecibles a priori, y dando resultados diferentes respecto a los registrados con los supuestos de la visión tradicional.

En la sección siguiente se profundizará la discusión en lo que hace a la aplicación del enfoque complejo al ámbito de las finanzas.

3.3. Evolución de la Teoría Financiera

En primer lugar se resume el enfoque clásico de la teoría financiera para luego sintetizar un conjunto de críticas las cuales, más adelante, servirán de base para construir el enfoque complejo.

3.3.1. Modelización clásica y sus críticas

Las hipótesis clásicas que se han utilizado para modelar el mercado de capitales son básicamente dos (Fama, 1965):

- **Hipótesis de Mercado Eficiente:** establece que los precios de las acciones reflejan la información tanto de aquellos hechos que han ocurrido en el pasado como de aquellos que el mercado espera que ocurran en el futuro.
- **Hipótesis del *Random Walk*:** los rendimientos sucesivos son independientes y están idénticamente distribuidos a largo del tiempo. En síntesis, son variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas, asumiéndose por lo general que siguen una distribución normal. La contraparte en tiempo continuo estaría dado por el proceso de Wiener.

La hipótesis de mercados eficientes establece que los precios reflejan toda la información pública, fundamental¹⁰ e histórica, la cual es compartida por todos los jugadores o participantes del mercado. Luego, los precios presentan variaciones cuando se recibe nueva información. En teoría, no sería posible "sacar ventaja" en un mercado eficiente, por dos motivos: por un lado, los precios reflejan toda la información disponible, por otro, el número de participantes es tan grande que asegura la convergencia a un precio "justo". En este sentido, los inversores son considerados racionales: pueden diferenciar, en forma colectiva, la información relevante de la no relevante. Finalmente, se deriva de los preceptos anteriores, que dada la interpretación de la información relevante y compartida por todos, y luego de evaluar los riesgos implícitos en las operaciones, el mercado, o los precios de los activos que conforman el mercado, convergen a un precio de equilibrio.

L

¹⁰ El término fundamental se refiere a las variables estructurales de la economía y las empresas, como ser el crecimiento económico, la generación de beneficios, etc.

La hipótesis del *Random Walk* (o trayectoria aleatoria), establece que la información histórica no es relevante y, por lo tanto, los rendimientos presentes no se encuentran relacionados con los pasados; en otras palabras, los rendimientos son variables aleatorias estadísticamente independientes. En tanto, siguiendo el teorema central del límite, si las variables aleatorias son estadísticamente independientes y el número de observaciones es "lo suficientemente grande" (tiende a infinito), la distribución de probabilidad de la suma de tales variables converge a la distribución normal. Este último supuesto acerca de la normalidad de la distribución de los rendimientos posibilitó el uso de un amplio espectro de herramientas estadísticas.

Es necesario aclarar que la hipótesis de mercados eficientes no implica que los rendimientos de los activos se comporten como un *random walk*; no obstante, la hipótesis de *random walk* sí implica la existencia de mercados eficientes.

En síntesis, en las mencionadas hipótesis clásicas pueden identificarse, entre otros, los siguientes supuestos:

- Información perfecta y simétrica: perfecta en el sentido de que la información irrelevante no es tomada en cuenta (no hay información "engañosa") y simétrica en el sentido de que es compartida por todos (no existencia de asimetrías).
- Inversores racionales: toman sus decisiones en base a la lógica del costo-beneficio en función al *set* de información antes mencionado.
- Variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas
- Distribución normal

En base a los anteriores supuestos se han desarrollado innumerables modelos que intentan explicar al mercado de capitales, tales como el modelo de Valuación de Activos de Capital (CAPM), los desarrollos de Black and Scholes e incluso algunos preceptos del Modelo de Markovitz, entre otros que son comúnmente utilizados para la toma de decisiones estratégicas. Incluso, muchos de los modelos antes citados tienen supuestos adicionales, como ser la ausencia de costos de transacción, condiciones de arbitraje e igualdad de tasas pasiva y activa, entre otros. Si bien también son supuestos simplificadores, pueden ser soslayados mediante algunas modificaciones que, en principio, no alterarían las conclusiones fundamentales. No obstante, ello no se verifica en relación a los cuatro supuestos antes sintetizados.

En relación a los modelos estrictamente estadísticos, los supuestos de independencia y normalidad posibilitaron el uso de todo el bagaje del paradigma estadístico

aplicándolo al estudio de series de tiempo. Las representaciones econométricas pueden sintetizarse en los siguientes:

- Movimiento Browniano: independencia y normalidad de la distribución
- Modelos de regresión: corresponden al plano (paradigma) explicativo de la ciencia económica
- Modelos autorregresivos: corresponden al plano (paradigma) predictivo de la ciencia económica (ensayo sobre el realismo de los supuestos - *Freedman*)
- Modelos ARIMA: Varianza homocedástica
- Modelos GARCH: Varianza heterocedástica

Las características fundamentales de los anteriores es que son modelos estocásticos, en general lineales, y que asumen como supuesto el comportamiento normal de la función de distribución de probabilidad. Esto último no es menor, dado que todos los tests de hipótesis para evaluar la significatividad de los coeficientes estimados son diseñados en base a dicha distribución.

En tanto, en la mayoría de las representaciones anteriores, se asumía que la varianza era constante en todos los momentos, característica que limitaba la explicación o predicción de cambios en la volatilidad. No obstante, ello fue superado por los desarrollos de Engle (1982) al desarrollar representaciones de varianza heteroscedástica condicionada, que permitió modelizar series de precios que exhibían cambios pronunciados de volatilidad a lo largo del tiempo (convivencia de períodos de alta variación seguidos de períodos "calmos"). Cabe destacar que tal característica constituyó un avance fundamental en lo que hace a la predicción en los mercados de capitales.

3.3.2. La Teoría de Precios Especulativos

El primer "modelo" que intentó explicar la variación de precios, fue el expuesto por Luis Bachelier en 1900 y asume, como fue dicho, que los cambios sucesivos de un precio $Z(t)$ son variables estocásticas gaussianas independientes (hipótesis del *random walk*). En realidad, Bachelier desarrolló la contraparte del *random walk* en tiempo continuo, modelo que hoy es denominado "Movimiento Browniano" o "Proceso de Wiener" o "Movimiento Browniano de Wiener"¹¹.

L

¹¹ Cabe aclarar que la aplicación del Movimiento Browniano en la especulación financiera fue anterior a su descubrimiento por Brown en pequeñas partículas suspendidas en fluidos, y anterior a la teoría matemática posteriormente propuesta por Wiener (la cual formalizó lo observado por Brown).

Las propiedades del proceso propuesto por Bachelier o Movimiento Browniano pueden resumirse de la siguiente forma:

- Independencia del incremento de precios: conocer el pasado no brinda conocimiento acerca del futuro
- Continuidad de las variaciones de los precios: la evolución se da en un espacio continuo.
- Ruido blanco: las variaciones de los precios son secuencias de variables Gaussianas independientes.
- Ausencia de agrupamientos en momentos determinados de variaciones pronunciadas en los precios
- Ausencia de comportamientos cíclicos.

Como fue dicho, las anteriores propiedades permiten el desarrollo de modelos estadísticos, dado que cumple con las principales propiedades para la aplicación de tales herramientas. No obstante sus virtudes teóricas, tal modelo fue puesto en discusión dadas sus inconsistencias con el comportamiento empírico de series de precios de activos financieros.

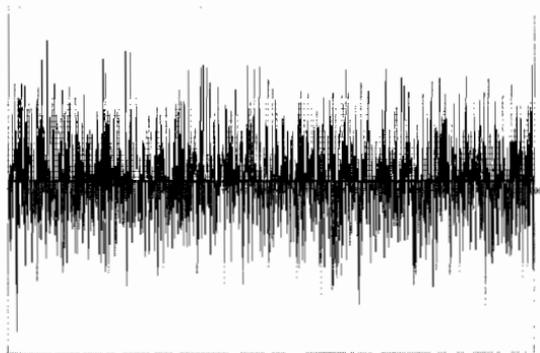
3.3.3. Inconsistencias del Modelo de Wiener

Benoit Mandelbrot (2004), cuyos aportes a la modelización del mercado de capitales serán abordados en este trabajo, sintetizó las siguientes inconsistencias empíricas del Modelo de Wiener o Movimiento Browniano:

- Cambios pronunciados en los precios son mucho más frecuentes que los predichos por el modelo de Gauss, reflejando el carácter leptocúrtico de los precios relativos.
- Cambios pronunciados instantáneos ocurren con frecuencia, al contrario de las predicciones, y habría evidencia de que los mismos podrían ser explicados por factores causales más que por modelos estocásticos.
- Cambios sucesivos en los precios no "lucen" independientes, más bien exhiben un gran número de patrones reconocibles, los cuales son, por supuesto, base del análisis técnico.
- Los registros de precios no lucen estacionarios. Además, indicadores estadísticos tales como la varianza muestral toman valores muy diferentes en diferentes momentos del tiempo. Cabe destacar que la no-estacionariedad impide la aplicación de un modelo estadístico que arroje resultados convenientes, al menos en lo que respecta a la precisión de los mismos.

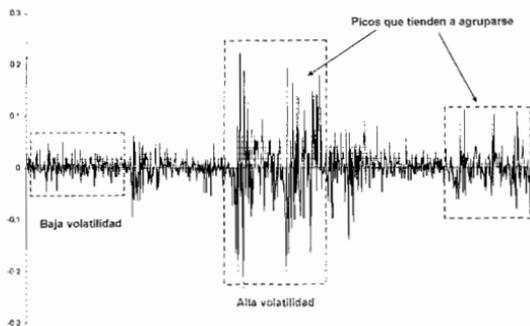
Incluso, Mandelbrot (1997) afirma que el modelo de Wiener no se condice con los hechos aún si se aplica una transformación logarítmica a las serie de precios estimada (es decir, si $Z(t)$ es reemplazado por $\log Z(t)$).

Gráfico 10: Ruido blanco



Fuente: *Elaboración propia*

Gráfico N° 11: ACINDAR
(tasa continua de variación del precio)



Fuente: *Elaboración propia*

En síntesis, la representación gráfica de un proceso de Wiener debería parecerse a la serie graficada en la figura 1, mientras que la evolución empírica de las variaciones de precios se asemejan a la serie de la figura 2 (en este caso, las variaciones corresponden a la especie Acindar para el período 1998–2006).

En síntesis, Mandelbrot *et al* (2004) advirtió sobre la no estacionariedad en las series de precios, que en sus variaciones coexisten períodos de baja con períodos de alta volatilidad (en el movimiento browniano la evolución es más uniforme). Además, señaló que se observan repetidas instancias de cambios discontinuos, representados por “picos” que se elevan por sobre la evolución de la serie; adicionalmente, tales picos tienden a concentrarse más que aparecer aislados e independientes a lo largo del rango temporal. Por último, como fue dicho, observó la existencia de ciclos conspicuos, distribución leptocúrtica y dependencia de largo plazo.

Cabe destacar que el propio Bachelier (1900) planteó la existencia empírica de distribuciones no gaussianas y dependencia estadística, pero no propuso modelos alternativos. Osborne (1962) agregó que el intercambio tiende a realizarse en forma explosiva (más que en formas estables) y Alexander (1964) también planteó que las variaciones de precios son no estacionarias.

La consecuencia de todo lo anterior es que los precios de los activos financieros no se podrían modelar de acuerdo al proceso de Wiener tal y como señala la Hipótesis del Mercado Eficiente.

3.3.4. Otras Críticas al modelo clásico

Resumiendo, Mandelbrot *et al* (2004) enuncia las siguientes críticas al “paradigma clásico”:

Supuesto: Los agentes son racionales y su único objetivo es obtener beneficios

- **Teoría:** Si a un agente se le presenta toda la información relevante acerca de un activo, puede determinar la mejor decisión que lo hará “rico y feliz”
- **Hechos:** Los agentes no piensan solamente en términos de un modelo de utilidad mensurable en unidades monetarias, ni tampoco actúan siempre de manera racional y puramente egoísta. La “economía del comportamiento” estudia cómo los agentes malinterpretan la información, cómo sus emociones distorsionan sus decisiones y cómo cometen errores al calcular probabilidades.

Supuesto: Los inversores son homogéneos

- **Teoría:** Los inversores tienen los mismos objetivos y los mismos horizontes de inversión, dada la misma información toman las mismas decisiones. Tienen

expectativas homogéneas y son tomadores de precios, no son formadores de precio. Son como moléculas en el estado perfectamente idealizado de un gas en la física: idénticos e individualmente insignificantes. Una ecuación que describe a uno de tales inversores puede ser reciclada para describirlos a todos.

- **Hechos:** los agentes no son homogéneos. Presentan diferente nivel de riqueza y diferentes perfiles de inversión. Unos compran y mantienen sus acciones por 20 años para un fondo de pensión mientras que otros las intercambian diariamente especulando a través de Internet. Algunos se fijan en el valor del activo buscando acciones de compañías que transitoriamente están fuera de "moda", mientras que otros buscan la dinámica de crecimiento del activo tratando de incorporarse a una tendencia creciente.

Matemáticamente sólo hace falta una sola heterogeneidad para generar un cambio drástico en la evolución de un mercado. Realizando un modelo de simulación donde interactúan *chartistas* y *fundamentalistas*, burbujas y caídas drásticas surgen del modelo en forma espontánea (endógena). El mercado pasa de ser lineal y "bien comportado" a otro que muestra una dinámica no lineal totalmente impredecible, caótica. Y esto se genera introduciendo solamente dos tipos distintos de inversores.

Supuesto: Los precios varían en forma continua.

- **Teoría:** en diferentes momentos de tiempos los activos y las tasas de cambio no saltan hacia cualquier punto, se mueven suavemente desde un valor hasta el siguiente. En términos de la teoría económica (*natura non facit saltum*, Marshall (1895)) se asume el "continuo", dando la posibilidad de tener a disposición un vasto instrumental matemático de funciones continuas y ecuaciones diferenciales. Para citar sólo un ejemplo, el modelo de Markowitz asume que los precios cambian en forma continua.
- **Hechos:** claramente los precios saltan tanto en forma trivial como en forma significativa. Forma trivial: los brokers habitualmente transan los precios en números redondos omitiendo valores intermedios. Forma significativa: casi todos los días en la Bolsa de Nueva York se generan "*order invalancies*" en una u otra acción. La discontinuidad es un ingrediente esencial de los mercados financieros, que separa a las finanzas del resto de las ciencias naturales.

Supuesto: Las variaciones de los precios siguen un proceso browniano.

- **Teoría:** el movimiento browniano es un término físico que describe el movimiento de una molécula en un medio de temperatura uniforme. Todo un conjunto de supuestos están asociados a esta idea:
 - Independencia: cada cambio en el precio, sea una suba de cinco centavos o un colapso de veintiséis dólares, es independiente del

anterior y las variaciones de los precios de la semana pasada o del año pasado no influyen a las de hoy. Esto implica que no se puede utilizar información pasada para predecir el futuro y por lo tanto que no tiene ningún sentido evaluar información histórica.

- Estacionariedad estadística en la variación de los precios: esto implica que el proceso que genera la variación de los precios, cualquiera que sea, se mantiene constante a lo largo del tiempo.
- Distribución normal: las variaciones de los precios siguen las proporciones de la curva acampanada - la mayoría de los cambios son pequeños y las variaciones grandes son extremadamente pocas. Además, la probabilidad de estas últimas disminuye exponencialmente.
- **Hechos:** la evolución de los activos es mucho más compleja, como mínimo el último supuesto es claramente contradicho por los hechos.

A continuación se presentarán algunos conceptos vinculados a la dinámica compleja y a los sistemas complejos, entendiendo que muchas de las críticas de Mandelbrot *et al.* (2004) pueden fundamentarse en la visión de la economía en general y de los mercados de capitales en particular, como sistemas dinámicos complejos, compuestos por agentes heterogéneos que interactúan en forma no-lineal y en continua adaptación.

3.3.5. Síntesis

La propuesta inicial de Bachelier (distribución gaussiana) fue reemplazada por modelos donde las variaciones de los precios siguen distribuciones log-normal, esto es, siguiendo un proceso browniano geométrico. No obstante, más adelante se identificaron algunos problemas de los procesos brownianos, los cuales pueden sintetizarse en principalmente dos:

- Existencia de colas pesadas en las distribuciones de probabilidades
- Fluctuaciones de tiempo en el segundo momento de las variaciones de los precios

Entre las alternativas propuestas, se han destacado los planteos de Mandelbrot, cuya hipótesis concreta postula que las variaciones de los precios siguen una distribución Levy-estable. La particularidad más grande es que estos procesos tienen "varianza infinita", lo cual imparte grandes implicancias en lo vinculado al concepto y a la estimación del riesgo.

Más adelante, hacia la década de los '80, en vistas de la rápida difusión de la teoría del caos, los intentos de aplicación de la misma al ámbito de las finanzas no se hicieron esperar. Es comúnmente aceptado en la teoría financiera que las series de tiempo de los precios de activos son impredecibles. Este postulado configura la piedra angular de la lectura de la dinámica de precios como un proceso estocástico. No obstante, como se ha desarrollado en este trabajo, la no-predictibilidad en series temporales y el concepto de proceso estocástico no son sinónimos. En este sentido, la teoría del caos ha mostrado que la no-predictibilidad en series temporales puede surgir de sistemas determinísticos no-lineales.

No obstante, Mantenga y Stanley (2000), entre otros, adoptan el enfoque estocástico, dado que sostienen que la evolución del precio de un activo depende de toda la información que afecta¹² a este, y que toda esa información no sería loable de ser descrita por un número reducido de ecuaciones determinísticas no lineales.

Esta visión es bastante compartida en el sentido que los sistemas caóticos, si bien su comportamiento es aperiódico e imprevisible, están explicados por un conjunto de ecuaciones relativamente simples. Intentar reducir el mercado de capitales a un conjunto reducido de ecuaciones determinísticas parece una idea bastante ambiciosa.

Es por ello que la aplicación de la teoría del caos quedó relegada a aspectos muy puntuales, como ser la reconstrucción del atractor de la serie temporal (testando si el mismo puede considerarse caótico), la estimación del exponente de *Lyapunov*, etc. No obstante, todo esto se realiza en general mediante técnicas estadísticas, dado que justamente lo que no se tiene es un modelo teórico de ecuaciones para aplicar el método de las perturbaciones, tal como se aplica por ejemplo en meteorología. En este sentido, si bien ha sido prácticamente imposible demostrar globalmente la hipótesis que el movimiento de los precios de los activos bursátiles siguen un proceso caótico, la riqueza de la teoría del caos ha permitido enriquecer el análisis de las series temporales, introduciendo conceptos como la amplificación del ruido, la dinámica atractora, el análisis de fractalidad, etc.

Luego, el enfoque que ha sido planteado por numerosas líneas de investigación y que conforma el núcleo de este trabajo es que los mercados financieros exhiben muchas propiedades de que caracterizan a los sistemas complejos. De acuerdo a Mantenga y Stanley (2000) son sistemas abiertos en los cuales muchas sub-unidades interactúan de manera no lineal ante la presencia de retroalimentación (*feedback*); y donde la evolución temporal del sistema es monitoreada en forma continua.

¹² O se tiene la creencia que afecta.

De acuerdo a los autores, los conceptos de escalamiento, universalidad, sistema desordenado frustrado, y sistema auto-organizado pueden ser útiles en el análisis y modelado de sistemas financieros y económicos.

El avance de las técnicas econométricas fue permitiendo la corrección de los modelos respecto a la visión cuasi platónica original:

- Mediante los modelos GARCH fue posible captar e incorporar la heteroscedasticidad
- Las colas pesadas pueden ser incorporadas mediante otras distribuciones teóricas como la Levy-Pareto
- La memoria de largo plazo puede ser captada mediante el coeficiente de Hurst.

No obstante, ninguno de los puntos anteriores ataca el núcleo de la cuestión: El eje no es analizar la serie temporal en forma *ex - post*, sino en intentar explicar cuál es el proceso generador para tener a la vista posibles trayectorias *ex - ante*. Es decir, en ningún caso se pone en juego la discusión acerca de los fundamentos estructurales de la teoría financiera, básicamente los supuestos de racionalidad y agente representativo (homogeneidad de expectativas) y las ya mencionadas hipótesis de eficiencia de los mercados y *random walk* (amén de las modificaciones mencionadas posibles, no se resigna el hecho que el proceso es puramente estocástico).

En este sentido, una propuesta alternativa es explicar el proceso, que se denomina enfoque generativo y constituye el eje de los modelos de agente. En palabras de Epstein (2006): "si no lo generaste no lo explicaste".

En esta línea, como fue adelantando en el capítulo previo, la descripción del mercado de capitales constituye uno de los ejemplos más paradigmáticos de los sistemas complejos. Es decir, cumplen con las principales dimensiones que caracterizan a ese tipo de sistemas: agentes heterogéneos, pluralismo cognitivo, organización jerárquica transversal, entre otros. Más adelante se realizará un diagnóstico más detallado de estas dimensiones.

Dentro de este marco, el interrogante que surge es el siguiente: para estimar el riesgo de un activo, ¿es mejor apelar al enfoque descriptivo (econometría) o al generativo (modelos de agente)?

Se intentará dar respuesta a este interrogante más adelante, a la vista de la evidencia empírica recolectada. Pero antes que ello, a continuación se exponen unos breves ejemplos paradigmáticos de modelos de agente que serán la base para luego

contrastar las dinámicas observadas durante los últimos años en los mercados financieros. Por ello, se presentan un conjunto de modelos que explotan algún aspecto de los sistemas complejos al análisis financiero.

3.3.6. Modelos y Simulaciones

3.3.6.1. Agentes en Interacción en Mercado de Capitales I

A continuación se sintetiza un modelo que explica las variaciones de los precios de un activo en base a la óptica compleja. El modelo ha sido desarrollado por Day y Huang (1990; 1993), y Grau (1997). No obstante, en esta oportunidad se tomará como referencia la síntesis presentada por Fernández Díaz (1999).

Se definen dos tipos de agentes:

1- Fundamentalistas: compran o venden en función de la desviación del precio observado respecto al precio fundamental (teórico).

La magnitud de la compra está dada por el coeficiente alfa. El mismo representa la "fuerza" de compra de este grupo de agentes. Cuanto mayor sea el valor de este coeficiente, más rápido se vuelca la diferencia de precio a una compra efectiva. Este valor se asume constante.

Por otro lado, se define una función de pérdida, que mide la desviación respecto a los precios máximos o mínimos que está dispuesto a soportar el inversor. Es decir, si el mercado alcanza dichos precios, el inversor no interviene en el mercado. Y cuanto más cerca este el precio de mercado de los valores máximos o mínimos, mayor será el valor de la magnitud de la pérdida.

Luego, la función debe cumplir con las siguientes propiedades:

$$f'(P_t) < 0 \quad P_t < P_t < P^*$$

$$f'(P_t) = 0 \quad P_t = P^*$$

$$f'(P_t) > 0 \quad P^* < P_t < P_s$$

De esta manera, la función de exceso de demanda de los fundamentalistas queda definida del siguiente modo:

$$D_{fd}(P_t) = \begin{cases} 0 & \left[P_t < P_s \right] \\ \alpha(P^* - P_t)f(P_t) & \left[P_t < P_t^* < P \right] \\ 0 & \left[P_t < P_t \right] \end{cases}$$

Nótese que la función de pérdida puede funcionar como un amplificador endógeno de la fuerza de compra. Es decir, a mayor desviación mayor valor de la función y por lo tanto mayor será la demanda de este grupo de agentes.

2- **Chartistas:** este grupo de agentes compran o venden según la tendencia del mercado. Tradicionalmente se acepta que compran cuando el mercado está a la suba y venden cuando está a la baja.

Para comenzar con una versión simplificada del modelo, se define la siguiente función de demanda para este grupo de agentes:

$$D_{ic}(P_t) = \beta(P_t - v)$$

Donde beta es la fuerza de compra de este grupo y v es un valor de referencia que se toma para la decisión de comprar o vender. Nótese que en este caso no se toma un indicador tendencial sino solamente un valor de referencia constante. No obstante, más adelante podrá complejizarse el modelo incorporando un indicador de tendencia del mercado.

La demanda agregada se define como la suma de los excesos de demanda de ambos agente:

$$D_t(P_t) = D_{fd}(P_t) + D_{ic}(P_t)$$

El precio de mercado forma de la siguiente manera:

$$P_{t+1} = P_t + \gamma D_t(P_t)$$

Es decir, el incremental del precio respecto al del período anterior se define como una porción del exceso de demanda agregado. Es decir, si la demanda es positiva el precio se incrementará en la porción f_i y viceversa.

Luego, incorporando las expresiones correspondientes, la ecuación de formación del precio es la siguiente

$$P_{i+1} = P_i + \gamma D_T(P_i) = P_i + \gamma(D_{jd}(P_i) + D_{ic}(P_i)) = P_i + \gamma(\alpha(P^* - P_i)f(P_i) + \beta(P_i - v))$$

Cuando $P_i > P_i^* < P_i$,

$$P_{i+1} = P_i + \gamma D_T(P_i) = P_i + \gamma(D_{jd}(P_i) + D_{ic}(P_i)) = P_i + \gamma(\beta(P_i - v))$$

Cuando $P_i > P_i^*$ y $P_i < P_i^*$

Por último, falta definir la función de pérdida, para lo cual se propone la siguiente forma:

$$f(P_i) = ((P_i - P_i^*)(P_i - P_i^*))^{-1}$$

Tomado a 0 y 2 como los precios mínimos y máximos, la función queda reducida a la siguiente expresión:

$$D_{jd}(P_i) = \alpha(P^* - P_i)(1/(2P_i - P_i^2)) \text{ con } 0 < P_i < 2$$

Gráfico N° 12: Valores de la función de pérdida

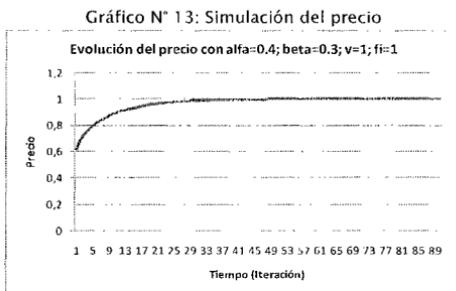


Fuente: Elaboración propia

3.3.6.1.1. Simulaciones

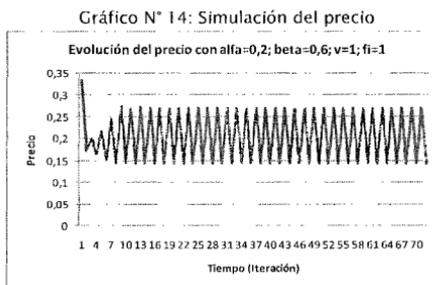
En este apartado se presenta un conjunto de simulaciones del modelo para distintos valores de los parámetros. Específicamente, en este ensayo se modificarán solamente los valores de alfa y de beta.

El resultado de la primera simulación arroja un equilibrio de punto fijo. Esto se condice con los valores asignados a alfa y beta; es decir, hay una fuerza relativa mayor de los fundamentalistas, motivo por el cual el precio se estabiliza en torno a su valor "fundamental".



Fuente: Elaboración propia

En tanto, si se impone una fuerza relativa mayor de agentes *chartistas*, el precio converge a un ciclo límite, alternando entre dos valores.



Fuente: Elaboración propia

Ahora bien, el resultado más interesante (menos intuitivo), se presenta a continuación. Si se impone un valor de alfa de 0.1 y de beta de 0.5, el sistema nunca se estabiliza. El precio se comporta en forma errática, siendo su comportamiento totalmente aperiódico en el largo plazo. Incluso, si se ensayan testeos para estimar el coeficiente de Lyapunov del sistema, el mismo resulta positivo. En base a ello, puede afirmarse que la trayectoria presentada es caótica.

Gráfico N° 15: Simulación del precio

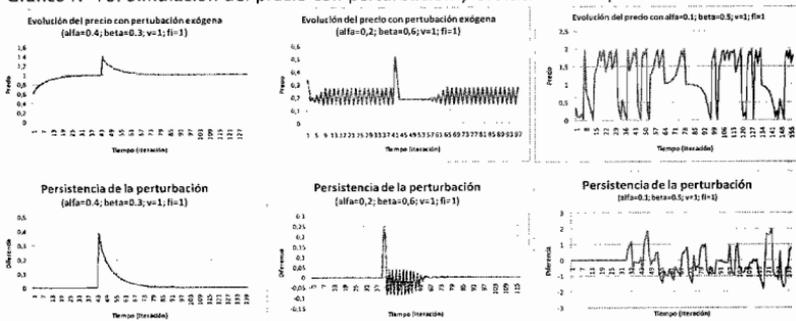


Fuente: Elaboración propia

Perturbaciones

Para analizar la estabilidad de las trayectorias se aplica la óptica de las perturbaciones. Al aplicar una perturbación exógena a cada una de las trayectorias presentadas se observa lo siguiente (se presenta la serie perturbada y en el gráfico inferior la persistencia de la perturbación):

Gráfico N° 16: Simulación del precio con perturbación y evolución de la perturbación



Fuente: Elaboración propia

Nótese que en los dos primeros casos, la trayectoria se estabiliza en torno a su sendero original luego de la perturbación exógena. Esto se aprecia en el gráfica de la persistencia, donde claramente luego de algún efecto transitorio en el largo plazo la perturbación directamente desaparece. En tanto, en la tercera figura se observa el comportamiento clásico de los senderos caóticos, es decir, el cambio abrupto en el comportamiento ulterior del sistema y la persistencia (e incremento) del efecto de la perturbación incluso en el largo plazo.

3.3.6.1.2. Conclusiones

En primera instancia, una conclusión general es la verificación de que es posible generar trayectorias complejas a partir de reglas de comportamiento relativamente simples. Y esto es justamente uno de los ejes de los sistemas complejos.

En segundo lugar, los resultados preliminares son consistentes con la interpretación conceptual:

- Una preponderancia de la fuerza *fundamentalista* genera que el precio se estabilice en torno al precio fundamental.
- Una preponderancia moderada de la fuerza *chartista* genera un alternancia entre precios (ciclo) que no logra ubicarse en torno a un valor.
- Una preponderancia extrema de la fuerza *chartista* genera que la trayectoria sea divergente.

Por otro lado, para ciertas combinaciones de los valores de alfa y beta, el sistema genera trayectorias caóticas. Nótese que esto no es a priori identificable, en el sentido que este comportamiento se da en muchos segmentos no continuos de los valores de los parámetros de control. Es decir que puede darse para muchas combinaciones muy diferentes de los mismos.

Por último, las trayectorias generadas por el modelo no se corresponden con el comportamiento empírico de los precios de los activos financieros en general. No obstante, el objetivo fue mostrar los tipos ideales del modelo. Las situaciones extremas pueden soslayarse mediante un mecanismo de adaptación. Es decir, permitir el cambio endógeno de los parámetros alfa y beta. Bajo esta hipótesis, se puede generar en una misma secuencia un alternado de estabilidad, ciclos y caos. Esto, traducido en la función de distribución del rendimiento de los precios, arroja resultados similares a las distribuciones empíricas. Este aspecto será introducido más adelante y constituirá un aspecto fundamental de este trabajo.

A continuación se presenta el modelo que fue desarrollado en el apartado de "modelos complejos en el área económica" pero en este caso aplicado al campo financiero.

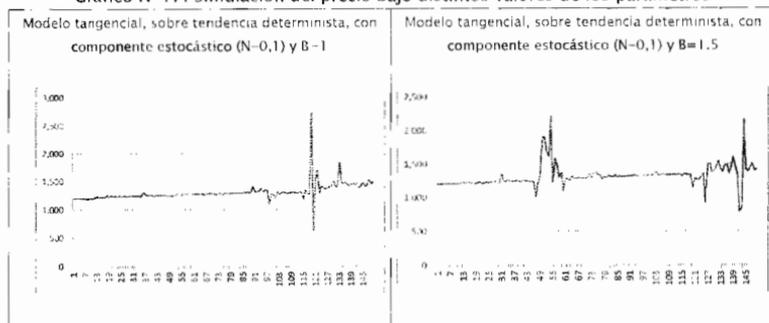
3.3.6.2. Agentes en Interacción en Mercado de Capitales II

Como fue dicho, el modelo que fue desarrollado en el punto 3.2.2.1 refería a dos agentes heterogéneos que influían sobre una variable (el producto) a través de determinado esquema de formación de expectativas. No obstante, este esquema también puede aplicarse a la modelización del mercado de capitales y, de hecho, contempla la misma microfundamentación de agentes que el caso antes presentado. Empero, este último intentaba graficar los casos polares bajo una óptica estrictamente determinista.

No obstante, la potencialidad de un modelo híbrido que ostenta sensibilidad a perturbaciones, es que permite replicar dinámica mayormente observadas en los mercados de capitales, y no tanto en la modelización de la evolución del producto bruto (que tiende a ser una variable mucho más estable en comparación con el índice bursátil de la economía en cuestión).

Como la arquitectura del modelo ya fue presentada, a continuación solamente se presentan a modo de ejemplo algunas trayectorias que simulan un fenómeno común en el mercado de capitales que es el *clustering*.

Gráfico N° 17: Simulación del precio bajo distintos valores de los parámetros





Fuente: Elaboración propia

En las cuatro simulaciones presentadas, que representan trayectorias para distintos valores del parámetro beta (representaba el algoritmo de adaptación), se genera *clustering*, es decir, concentración de volatilidad en períodos relativamente cortos de tiempo. Nuevamente, se presenta solamente como un ejemplo instrumental, sin analizar la correspondencia empírica de los valores asignados a los parámetros de control.

A continuación se presenta otro modelo, que intenta explicar un aspecto fundamental vinculado al proceso de forzamiento en el mercado financiero y asociado a la hipótesis de los mercados eficientes: la transmisión de información.

3.3.6.3. Modelo de Transmisión de Información

Otro aspecto fundamental que se observa en el mercado financiero es la asimetría de información. Claramente algunos agentes disponen de cierta información en forma oculta o acceden a la misma antes que otros. En este sentido, la forma en que se transmite la información no es instantánea, sino que va a estar dada por la "red de contactos del agente".

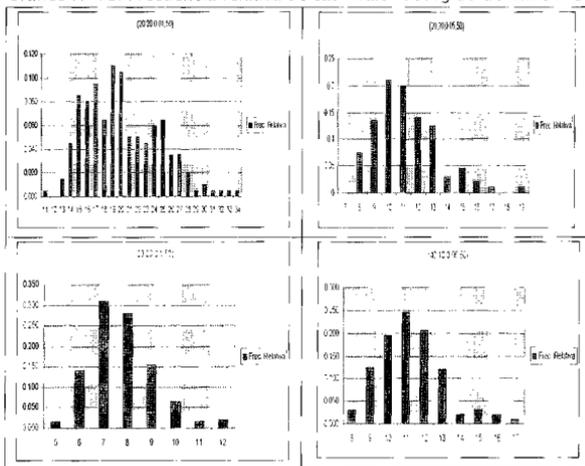
En este camino, Garnica, García y Maurette (2011) elaboraron un modelo de transmisión de la información basándose en la idea de que la información se transmite por contacto entre los agentes, utilizando como herramienta a los denominados

autómatas celulares. Los resultados del modelo muestran que existe la posibilidad de que se den tiempos muy largos para que la nueva información que surge llegue a todos los participantes del mercado, en marcado contraste con lo que postula la teoría clásica de las finanzas (Fama, 1965) que dice que la información llega de manera inmediata a todos los agentes y así se actualizan los precios de los activos, reduciendo al límite las posibilidades de arbitraje.

Este modelo constituye otro caso de sistema complejo, al introducir la dimensión espacial y la red de contactos de los agentes. En particular, a través de una retícula de autómatas celulares.

Los gráficos siguientes muestran la frecuencia relativa de cada valor t surgido del muestreo del modelo para diferentes *sets* de parámetros. El gráfico entonces es un histograma y se puede leer como la probabilidad de que se dé una cierta cantidad de tiempo para que la información llegue a todos los agentes del mercado. En la mayor parte de estos, se pueden ver las colas anchas, la leptocurtosis, la asimetría y cómo hay ciertos valores extremos con probabilidad mayor a la que la escuela clásica predice.

Gráfico N° 18: Frecuencia relativa de cada valor t surgido del muestreo





Fuente: Garnica, García y Maurette (2011)

3.3.6.3.1. Conclusiones

La teoría del mercado eficiente postula que el precio de los activos refleja toda la información pertinente a los mismos, y que si aparece cualquier tipo de información nueva, ésta se incorpora inmediatamente al precio, dejando sin sentido la noción de arbitraje. Es decir, ya que todos los agentes del mercado están al tanto de toda la información pertinente para valuar los activos, nadie tiene ventaja. Sin embargo, este modelo postula la posibilidad de que a veces la información tarda en llegar a todos por igual (leptocurtosis y colas anchas hacia la derecha). De acuerdo a esto, no solamente pueden generarse oportunidades de arbitraje sino que puede explicarse por qué ciertas situaciones de desequilibrio perduran en el tiempo. Un factor explicativo es que no siempre la información se transmite de manera rápida, sino que depende de cómo empieza el mecanismo de transmisión, de la forma del mercado (en cuanto a su arquitectura espacial) y a la cantidad de agentes en el mismo. Respecto a esto último, a mayor cantidad de agentes, es mayor la probabilidad de eventos extremos. En la simulación presentada, sólo se ha muestreado hasta 400 agentes, con lo cual es de esperar que en mercados en los cuales esa cantidad es mayor (cualquier mercado financiero real) también sea mayor la probabilidad de que la información tarde tiempo en llegar a todos los agentes, traduciéndose en mayores desvíos respecto al equilibrio y por lo tanto de oportunidades de arbitraje.

3.3.6.4. Síntesis de los resultados

Se ha resumido el marco conceptual de la aplicación de los sistemas complejos al campo de la economía y las finanzas. Se ha mostrado sobre bases teóricas que es posible incorporar en estos modelos los siguientes aspectos:

- La interacción de agentes con distintos esquemas de formación de expectativas (léase distinta forma de comportamiento) genera fluctuaciones endógenas sin la intervención de componentes estocásticos.
- Además, en ciertos casos es posible observar resultados no previsibles a priori, o mejor dicho no deducibles a partir del comportamiento individual de cada agente por separado; como por ejemplo un sendero caótico. Esto es lo que se denomina dinámica emergente.
- La incorporación de la influencia del contexto (como por ejemplo el sentimiento del mercado) es la explicación de la generación de fluctuaciones en el ciclo de negocio.
- La estructura del mercado es un factor de incidencia sobre la asimetría de la información, generando ajustes más largos en los precios que lo establecido en los mercados tradicionales. Esto implica que no todo el mercado estará descontando toda la información disponible, explicando en ciertos contextos los desequilibrios en la valuación de los activos.

3.3.7. Aplicación del enfoque complejo a través de los ABM

3.3.7.1. Lo nuevo y lo viejo

En primer lugar es importante destacar que, al igual que la visión de la economía como un sistema complejo (ya fueron mencionados los trabajos de Marshall, Kaldor y Hayek), y también gran parte del marco conceptual de los modelos de agente puede encontrarse todo a lo largo de la historia de la construcción de la ciencia económica (Hommes, 2006). En el caso particular del campo conductista, muchos elementos claves se vinculan a Keynes (las expectativas juegan un rol fundamental), Simon (racionalidad limitada) y Kahneman y Tversky (reglas heurísticas).

Por otro lado, la idea de explicar lo macro a través de lo micro ("macroeconomía microfundamentada") no es para nada novedosa. En efecto, toda la macroeconomía moderna se caracterizó fundamentalmente por adoptar ese enfoque. No obstante, lo hizo con una microfundamentación única: el supuesto del agente representativo. Es decir, se podría afirmar que ciertos modelos neoclásicos son "ABM's de un solo agente". Tal vez por este motivo algunos autores, como Hommes (2006), hablan de modelos de agentes heterogéneos ("HAM's") en lugar de modelos basados en agentes (ABM's). No se cree necesario hacer uso de la distinción, en virtud que la denominación ABM's ya se identifica como una escuela alternativa.

Dónde radica entonces la "novedad" del enfoque complejo. Básicamente, como fue explicado a lo largo del punto 3.2 de este trabajo ("Sistemas complejos adaptativos en economía), en levantar el supuesto de agente representativo por un lado (incorporando agentes heterogéneos), y levantando el supuesto de racionalidad por otro (adscribiendo a la racionalidad limitada y el pluralismo cognitivo). Además, se genera un cambio crucial en el enfoque analítico. Estos temas se sintetizan a continuación.

3.3.7.2. La dinámica de los fenómenos observados

La dinámica no lineal, la caótica y los sistemas complejos tienen importantes consecuencias para la validez de la hipótesis de expectativas racionales. En una economía estable de relaciones lineales con un único *steady state* parecería normal que los agentes aprendan a formar expectativas racionales, al menos en el largo plazo. Pero en un mundo no lineal, complejo, con variables que oscilan irregularmente dentro de un atractor extraño, ¿es factible que los agentes mantengan su esquema de expectativas racionales? (Hommes, 2006).

En el campo financiero, uno de los puntos que motivan la popularidad de los modelos de agentes heterogéneos (no racionales) es el hecho que los movimientos de los precios de los activos se encuentran muchas veces desligados de los movimientos en los *fundamentals* del mercado (Hommes, 2006). Pueden observarse estudios acerca del exceso de volatilidad en Shiller (1981, 1989) y LeRoy y Porter (1981), sobre la apreciación y depreciación del dólar en Frankel y Froot (1986) y sobre los movimientos en el S&P500 en Cutler et al. (1989), en todos los casos concluyendo que no existen vinculaciones respecto a cambios en *fundamentals*.

En lo que hace a la aplicación de los ABM, una de sus mayores fortalezas es que han logrado explicar los hechos estilizados observados en series financieras, los cuales se enumeran a continuación (bajo frecuencia diaria):

- i. Los precios de los activos siguen un proceso con raíz cercana a ser unitaria
- ii. Los rendimientos son impredecibles y casi no exhiben correlaciones
- iii. Los rendimientos presentan colas pesadas
- iv. Las series financieras exhiben *clustering* de volatilidad

Los hechos uno y dos son consistentes con la hipótesis del *random walk*. No obstante, Cutler et al. (1989) han demostrado que una parte sustancial de los movimientos en los precios de los activos bursátiles es de difícil vinculación con la entrada de nueva información. Por lo tanto, un modelo de agente racional falla al explicar el tercer hecho estilizado. Misma cuestión para el cuarto hecho: asumiendo que la información

económica no aparenta expresarse en forma de *clustering*, tampoco puede darse una explicación a partir de agentes racionales.

Este es un punto fundamental, y se vincula a la estructura del sistema y su proceso de forzamiento, tal como fue descrito en el punto 2.2.2 de este trabajo. En este caso, el forzamiento esta dado por la nueva información que perturba el sistema. Asumiendo una estructura tradicional (un sendero de equilibrio bajo relaciones lineales), si la evolución observada presenta *clustering*, entonces el proceso de forzamiento debe ostentar dicha dinámica. Si al estudiar el mencionado proceso de forzamiento se invalida esta hipótesis, habrá que replantear la estructura del modelo, ergo evaluándose la posibilidad que el *clustering* de la trayectoria sea producto de la dinámica endógena (emergente) de un sistema complejo. Vale destacar que muchos ABM, como los desarrollados por Lux (1995, 1998) logran explicar los 4 hechos estilizados en forma simultánea y satisfactoria.

3.3.7.3. La validez de la microfundamentación alternativa

Como fue dicho a lo largo de este trabajo, la construcción de un ABM implica levantar la hipótesis de racionalidad y dotar a cada agente de una regla de comportamiento heurística.

En este sentido, Simon (1957) sostuvo que la recopilación de información y los costos de procesamiento funcionan como obstáculo al comportamiento totalmente racional y optimizador. Los agentes deben enfrentarse a pagar el costo de recolección de información y además esforzarse en calcular mecanismos de optimización, u optar por la aplicación de reglas simples cuya performance sea relativamente razonable.

En tanto, muchas encuestas en el área de expectativas, particularmente sobre los tipos de cambio, han determinado que los *practitioners* utilizan diferentes estrategias de pronóstico y trading (véanse los estudios de Frankel y Froot (1990b), Allen y Taylor (1990), Ito (1990) y Taylor y Allen (1992)). Un resultado común es que los *traders* operan bajo estrategias *chartistas* (extrapolación) en el corto plazo y fundamentalistas (reversión a la media) en el largo plazo. Una aseveración muy descriptiva puede encontrarse en Frankel y Froot (1987): *It may be that each respondent is thinking to himself or herself, "I know that in the long run the exchange rate must return to the equilibrium level dictated by fundamentals. But in the short run I will ride the current trend a little longer. I only have to be careful to watch for the turning point and to get out of the market before everyone does"*.

Por último cabe mencionar que incluso existen ABMs que analizan (y emulan) el dilema del uso del modelo completo vs. el uso de reglas heurísticas. Las estrategias "simples"

incluyen expectativas *naive*, extrapolación de tendencias, técnicas de trading simples (comprar o vender cuando el precio alcanza cierto valor), etc. Del lado de las estrategias sofisticadas se encuentra el análisis fundamental del mercado y/o la predicción de variables macroeconómicas tales como inflación y el desempleo.

3.3.7.4. La construcción del modelo y el enfoque analítico

Siguiendo lo propuesto por Epstein (2006) los ABM's se construyen de forma "generativa", es decir recreando los agentes, las relaciones, el espacio y observando las dinámicas que se generan entre todos esos elementos. En palabras del autor, la receta canónica para un experimento de acuerdo a la metodología ABM sería la siguiente:

Situar una población inicial de agentes heterogéneos autónomos dentro de un espacio determinado, dejarlos interactuar de acuerdo a simples reglas locales y entonces generar (o construir) la evolución macroscópica de abajo hacia arriba.

En síntesis, el enfoque generativo plantea un verdadero ejercicio de laboratorio, donde buscan crearse situaciones y escenarios a partir de agentes que al inicio actúan en forma autónoma (y por lo tanto no puede predecirse a priori la evolución resultante del sistema en su conjunto). Esto adscribe una diferencia metodológica muy marcada respecto a la modelización del *mainstream* neoclásico.

De acuerdo a Epstein (2006), para el generativista, preocupado por la formación de dinámicas, no es satisfactorio establecer que si se ubica al sistema dentro de un punto de equilibrio, éste permanecerá en el mismo. Mayormente, el generativista busca sintetizar la configuración que se origina a partir de un sistema descentralizado de agentes heterogéneos. De allí el famoso lema "si no lo generaste, no lo explicaste".

Respecto al enfoque analítico, cabe hacer el interrogante de cómo se analizan las posibles soluciones del sistema (o características o condiciones de equilibrio).

La modelización mediante los ABM focaliza su análisis en la trayectoria del sistema (económico) más que en su estado de equilibrio, lo cual implica que no es necesario limitar el análisis económico solamente a aquellos modelos que derivan en algún estado de equilibrio (Cazian, 2009). En otras palabras, aunque existiese, no es necesario concentrarse en el equilibrio, porque es justamente la dinámica el aspecto inseparable de un modelo ABM. El aspecto más enriquecedor es la mera observación de si para algunas configuraciones de los parámetros el modelo simula comportamientos emergentes.

Respecto a esto, se ha esgrimido como crítica que las simulaciones son difíciles de interpretar en virtud que generalmente no se dispone de una forma estructural del modelo ABM. Es decir, dada la dificultad de traducir las reglas de comportamiento dentro de un modelo matemático, resulta casi imposible aislar la función de acción y reacción para identificar las fuentes de la dinámica emergente.

No obstante, los modelos de simulación sí pueden ser descriptos mediante un *set* bien definido de funciones matemáticas (Leombruni y Richiardi, 2005), amén que sean algebraicamente difíciles de analizar.

Por lo tanto, resulta posible analizar el comportamiento estructural a partir del *set* de ecuaciones para diferentes valores de los parámetros y condiciones iniciales. Sobre la serie simulada, resulta posible estimar un modelo que se ajuste a esa información artificial. Una vez recobrado el meta-modelo, resulta más simple interpretar la simulación.

3.4. Cierre de la Sección Tercera

En esta sección se esbozó una definición de sistema complejo, y se busco su aplicación a la economía y las finanzas a través de los denominados modelos de agente siguiendo el enfoque generativo.

Se presentó un conjunto de modelos de simulación que cumplen con las definiciones de sistema complejo mostrando que sus resultados cambian drásticamente respecto a los planteos del *mainstream* neoclásico.

Por último, se presento una síntesis donde se puntualizan los puntos principales donde los ABM superan a los modelos clásicos, realizando sendas referencias a modelos de agente construidos. También presenta la discusión respecto al enfoque analítico de la ciencia generativa.

En suma, los aportes hasta este momento son mayormente teóricos. En este sentido, en la sección siguiente se relevaran hechos estilizados a los fines de evaluar la aplicación de los conceptos y metodologías desarrolladas a casos concretos. Para ello, se abordan dos casos de estudio:

1. El primero consta de un relevamiento de los mercados de capitales en el contexto previo y durante la crisis internacional del 2008–2009. Se analizarán

los principales mercados bursátiles con el objetivo de sacar conclusiones acerca de los mecanismos de estimación del riesgo.

2. El segundo evalúa el impacto macroeconómico de la crisis en el conjunto de países que componen el bloque denominado "América Latina y el Caribe".

En base a los hechos estilizados que serán resumidos de ambos relevamientos, será testeada la correspondencia entre el marco teórico planteado y los resultados del análisis empírico. El concepto que cruza a ambos casos de estudio es la interpretación de la dinámica emergente como locus del riesgo de un sistema complejo.

CUARTA PARTE

4. CASOS DE ESTUDIO

En esta sección se presenta dos casos de estudio, los cuales conforman el análisis empírico de este trabajo:

- En primer lugar se analizan los índices bursátiles más representativos del mercado mundial durante el período enero 2003 – diciembre 2010. En este caso, eje del análisis estará puesto evaluar la viabilidad del análisis estadístico descriptivo tradicional en lo que hace a la estimación del riesgo. En primera instancia se intentará verificar si los hechos estilizados descriptos por la literatura y sintetizados en el marco teórico se verifican en el caso relevado. En segundo lugar se evaluará la conveniencia o no de aplicar el enfoque generativo o sus implicancias derivadas. El relevamiento se realiza íntegramente sobre bases primarias y abarca una muestra que representa casi el total del mercado bursátil mundial.
- En segundo lugar se analizará el impacto de la crisis internacional en el bloque latinoamericano. En este caso, el análisis no es de tipo estadístico sino de tipo descriptivo, relevando la evolución de un conjunto de agregados macroeconómicos. La base de análisis se realiza sobre fuentes primarias y secundarias y tendrá como objetivo plantear la factibilidad de aplicar la dinámica compleja como meta-modelo de análisis. Se profundizará el caso Argentino.

4.1. CASO I: La Dinámica del Mercado de Capitales

En este capítulo serán analizados en forma específica los mercados de capitales. Se realizará un análisis estadístico sobre fuentes primarias, recolectando datos de una proporción muy significativa del mercado mundial.

El objetivo primario será observar la evolución de las series temporales y determinar sobre la base del análisis descriptivo si se observan dinámicas asemejables a las descriptas en el marco teórico, obteniendo evidencia a favor (o en contra) para la aplicación de un modelo complejo.

En segunda instancia, y vinculado a lo anterior, se evaluará la performance de los indicadores de estimación del riesgo tradicionales. En este sentido, el objetivo último será sacar conclusiones acerca de la estimación del riesgo en vistas de la implosión de la crisis financiera internacional del 2008–2009, o crisis *sub-prime*.

Mercados analizados

En primer lugar se analizará el mercado mundial. Como resulta engorroso presentar el gran caudal de información, se sintetizará el análisis construyendo un indicador agregado que representa el promedio del mercado mundial. El mismo se construye ponderado los distintos mercados relevados.

En segunda instancia, a los fines de observar la dinámica particular de cada mercado (y evaluar si existen singularidades respecto al caso general), se toma una sub-muestra de cuatro mercados, dos del mundo desarrollado (EE.UU. y Alemania) y dos del mundo emergente (Brasil y Argentina).

La secuencia del análisis es la siguiente:

1. En primer lugar se analizarán series que comprenden todo el período estudiado, en este caso se tomo desde enero del año 2003 hasta diciembre del año 2010. Comprende la fase de expansión, crisis y recuperación.
2. En segunda instancia se estudiará solamente el preludio de la crisis (fase de expansión), tomando como referencia el período comprendido entre 2003 y 2007 inclusive.
3. Por último, se analizara específicamente el período de crisis, comprendido entre 2008 y 2009.

Cabe destacar que en todos los casos se llevará adelante, en primera instancia, el análisis estadístico y econométrico tradicional, analizando:

- Las tendencias de las series
- Los rendimientos promedios y sus desviaciones
- Las características de la distribución de la muestra
- La presencia de heteroscedasticidad

El objetivo primario de este relevamiento será evaluar la capacidad de estimación del riesgo de los métodos tradicionales y por lo tanto fundamentar si se justifica o no aplicar el enfoque alternativo desarrollado en el marco teórico.

4.1.1. El mercado Mundial

Para realizar un primer relevamiento en términos agregados, se ha construido una ecuación del "mercado mundial". Básicamente, se han seleccionado un conjunto de mercados y se los ha ponderado por la participación porcentual del PIB de cada país dentro de la muestra. Vale destacar que la variable analizada son los rendimientos (diarios) en dólares de los índices bursátiles representativos de cada país.

La muestra seleccionada es la siguiente: EE.UU., Alemania, Francia, Inglaterra, Italia, Canadá, Corea del Sur, Japón, Indonesia, Rusia, India, Irlanda, España, Grecia, Brasil, Perú, México, Colombia, Venezuela, Chile y Argentina.

Vale destacar que el conjunto de países listados representan el 58% del producto bruto mundial (incluyendo China¹³). Medido en términos de capitalización bursátil, la muestra es aún más representativa, dado que solamente el bloque latinoamericano, Canadá, EE.UU., Japón, Francia, Alemania, Italia, España, el Reino Unido representan el 64,5% del mercado de capitales del mundo. Si a esto se le suman el resto de los países seleccionados (Corea del Sur, Indonesia, Rusia, India, Irlanda y Grecia) el porcentaje se incrementa sustancialmente. Por lo tanto se concluye que se trabaja con una muestra altamente representativa del mercado mundial.

En primer lugar se analizará toda la serie durante el la totalidad del período 2003-2010, para luego segmentarla en el período pre-crisis y período de crisis.

4.1.1.1. Período 2003-2010

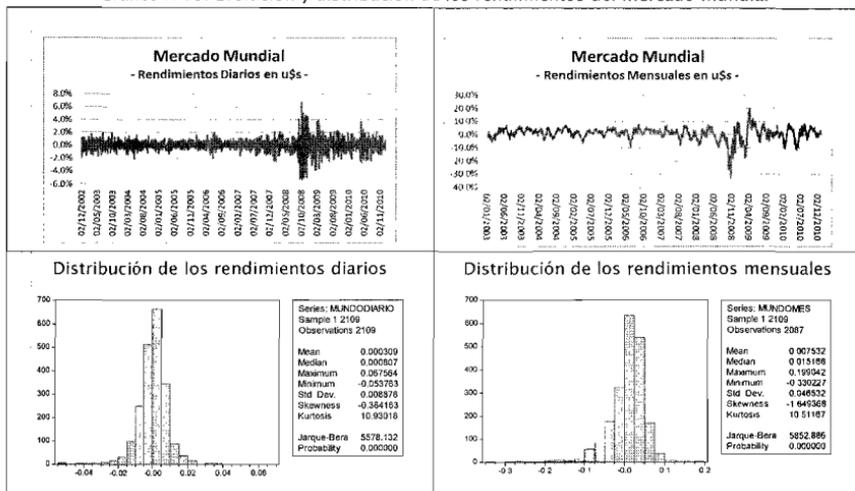
A continuación se presenta la evolución de los rendimientos diarios del mercado mundial, medidos en dólares.

Se observa una evolución aparentemente "normal" hasta principios de 2008, amén de observarse algunos desvíos importantes. No obstante, en octubre de 2008 el quiebre es estructural, generándose un fuerte estallido de volatilidad concentrado en segmentos muy cortos del horizonte analizado. Esto se genera tanto para los rendimientos diarios como para los mensuales.

L

¹³ En realidad, China debería ser excluida dado que no tiene un mercado de capitales comparable, por lo tanto la representatividad de la muestra en términos de PIB es aún mayor.

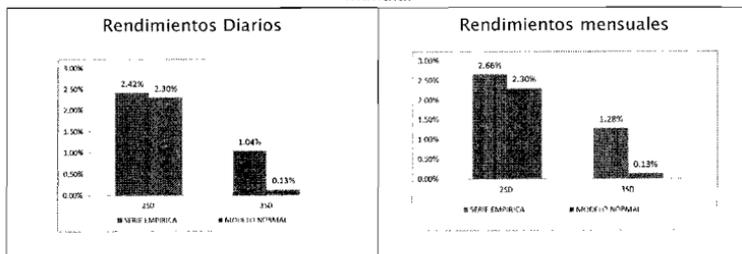
Gráfico N°19: Evolución y distribución de los rendimientos del mercado mundial



Fuente: Elaboración propia en base a datos de Bloomberg.

En lo que respecta a las distribuciones de probabilidad, ambas resultan marcadamente leptocurticas con mayor incidencia de valores extremos (colas pesadas) respecto al modelo normal. Por otro lado, nótese que los rendimientos mensuales tienen una fuerte incidencia en los rendimientos negativos extremos. Esto se observa con mayor claridad en los gráficos siguientes.

Gráfico N°20: Cola izquierda de la distribución de los rendimientos del mercado mundial

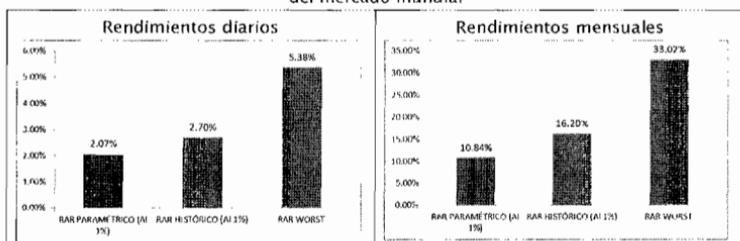


Fuente: Elaboración propia en base a datos de Bloomberg.

En los mismos se grafica la cola izquierda de la distribución de probabilidad, comparando la proporción de casos que contempla el modelo normal y los correspondientes a la serie empírica. Se observan dos cuestiones: las diferencias más marcadas se dan más allá de los tres desvíos estándar, tanto en los rendimientos diarios como en los mensuales. Esto corrobora la existencia de colas pesadas antes mencionada. En segunda lugar, la discrepancia es mayor en el caso de los rendimientos mensuales.

Por último se presenta la medición del *return at risk* (RAR) en su forma paramétrica, histórica y *worst*. Para los dos primeros casos se asume una confianza del 99%.

Gráfico N°21: *Return at Risk* (RAR): Paramétrico, histórico y *Worst* de los rendimientos del mercado mundial



Fuente: Elaboración propia en base a datos de Bloomberg.

En el caso de los rendimientos diarios, no se observa una diferencia muy marcada entre la estimación paramétrica y la histórica. En el caso de los rendimientos mensuales, la brecha se incrementa un poco. En tanto, el peor caso de la serie resulta evidentemente elevado.

En síntesis, hasta este punto se ha corroborado que la serie analizada presenta heteroscedasticidad, clustering, colas pesadas y demás características que comúnmente se asocian a las series de activos bursátiles. La influencia de la crisis es muy marcada en la serie temporal, expresándose como un salto imprevisto de volatilidad y generando los eventos extremos que hacen perder potencia a las estimaciones históricas y paramétricas. Por otro lado, se han estudiado los rendimientos diarios y los mensuales, mostrando que los resultados son análogos independientemente de la escala (los resultados no cambian, más bien se potencian en el caso de los rendimientos mensuales).

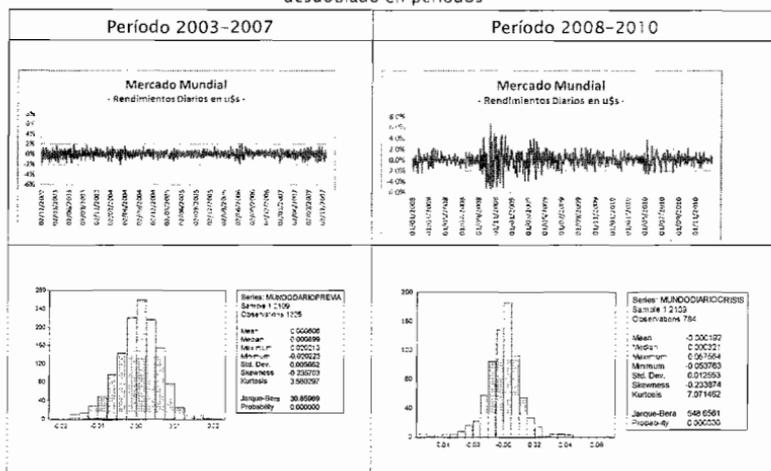
Ahora bien, el experimento más importante es analizar la serie en dos segmentos, a los fines de visualizar la dinámica en el período previo a la crisis (en este caso, desde el año 2003 al 2007 inclusive) y contrastarla con lo ocurrido durante la crisis (período 2008–2010). Este ejercicio se hace a los fines de establecer que brecha separa a las estimaciones estadísticas tradicionales del riesgo durante un período determinado y lo acaecido en el período siguiente.

4.1.1.2. Comparación: contexto previo y crisis

A los fines de simplificar la presentación de la información se analizarán solamente los rendimientos diarios, dado que como fue dicho la serie mensual no cambia los resultados cualitativos del estudio.

En primer lugar se compara la evolución de las series y su distribución de probabilidad.

Gráfico N°22: Evolución y distribución de los rendimientos del mercado mundial desdoblado en períodos



Fuente: Elaboración propia en base a datos de Bloomberg.

En lo que hace a la evolución, el período pre-crisis ostenta una baja volatilidad relativa, además de ser relativamente uniforme. En tanto, durante el período de crisis se observa un incremento importante de la volatilidad, pero que no se da en forma

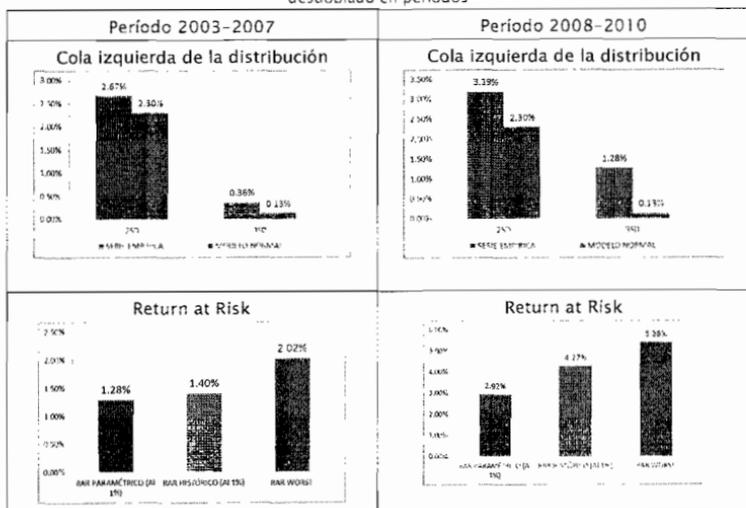
uniforme sino que se expresa en forma heteroscedástica, con un importante *clustering* combinado con períodos (si bien cortos) de niveles de volatilidad análogos al contexto previo.

Con respecto a la distribución de probabilidad, nótese que la correspondiente al período previo tiene bastantes semejanzas a la campana de gauss, amén de arrojar una leve asimetría y un leve apuntalamiento (curtosis de 3.5 frente a 3 del modelo normal). Si bien rechaza la hipótesis de normalidad, cabe recordar que el test de Jarque-Bera es muy sensible, tendiendo a sobre-rechazar la hipótesis nula.

La distribución correspondiente al período de crisis expresa un apuntalamiento mucho más marcado, expresado también en un importante incremento en la densidad de las colas de la distribución. En este caso el coeficiente de curtosis supera los 7 puntos.

El peso de las colas (izquierdas) de las distribuciones puede observarse en los gráficos siguientes. Nótese que la discrepancia con el modelo normal es bastante pequeña en el período previo, tanto en los casos que superan los dos desvíos estándar como en los que superan los tres. En tanto, en el período de crisis las diferencias son muy pronunciadas, sobre todo en los eventos extremos: la probabilidad de superar los tres desvíos estándar es casi 10 veces superior en el caso empírico respecto al caso normal.

Gráfico N°23: Cola izquierda de la distribución y RAR de los rendimientos del mercado mundial desdoblado en períodos



Fuente: Elaboración propia en base a datos de Bloomberg.

Por último, se presenta el cálculo del *return at risk* (RAR). En el período previo se observa que no existe demasiada discrepancia entre la estimación paramétrica y la histórica. Esto se corresponde con la semejanza al modelo normal antes mencionado.

Como es esperable, en el período de crisis el indicador se incrementa estrepitosamente. No obstante, hace falta una sola comparación para evaluar la robustez del indicador en términos predictivos (que en definitiva es para lo que se usa). Ni siquiera el peor caso del período previo, sirvió para estimar la mínima pérdida a la se estuvo expuesto durante la crisis. Es decir, el RAR *Worst* del período previo fue de 2.02%, mientras que el RAR paramétrico (el menor) del período de crisis ascendió a 2.92%.

En síntesis, surgen algunas cuestiones e interrogantes respecto al relevamiento realizado. En primer lugar, ¿había alguna señal en el contexto previo que fuera posible predecir o al menos resguardar frente a lo que fue el escenario posterior? En principio la respuesta es rotundamente negativa, en el sentido que las dinámicas no sólo son completamente adversas sino que además no se observa prácticamente transición entre un contexto y otro; la crisis implosiona en forma estrepitosa.

El interrogante que surge es el siguiente: ¿es una estrategia equivocada aplicar los métodos estadísticos tradicionales para la gestión del riesgo financiero? Claramente esta pregunta tiene dos respuestas muy contundentes y triviales al mismo tiempo:

La primera es que a la vista de la dinámica observada en el período previo, nada justifica desviarse del paradigma normal, porque de hecho, la evidencia empírica muestra un comportamiento con mayores semejanzas a un proceso normal que a otro. Es decir, si se analiza solamente la serie temporal, el costo de resignar el modelo normal respecto al ajuste empírico que se estaba dando resulta muy alto.

La segunda es que, en los hechos, el apelar al uso de la historia (observar sólo la serie temporal) llevó a una subestimación extrema del riesgo. En el contexto de la crisis, la desviación respecto no solo al modelo normal sino también a la distribución empírica previa es directamente contundente, no habiendo ni una mínima señal de alerta que permita predecir el fenómeno. Y esto es, justamente, lo que a lo largo de este trabajo se definió como dinámica emergente.

En definitiva, la subestimación del riesgo fue contundente en el marco del uso de la historia reciente para cuantificar el mismo, en un fenómeno que en virtud de la literatura puede clasificarse como "complejo".

Hechos los comentarios pertinentes, resta un interrogante que hace a la representatividad del caso estudiado: ¿existen excepciones a lo largo de los mercados respecto al promedio ponderado del mercado mundial analizado?

Para responder al planteo y dar más sustento al análisis en el apartado siguiente se estudian cuatro mercados en forma individual (dos desarrollados y dos emergentes) replicando el análisis expuesto hasta el momento. Además, para particularizar aún más el caso, se analizarán los rendimientos en moneda local.

4.1.2. Mercados Desarrollados y Emergentes

A continuación se realiza un análisis descriptivo de los cuatro mercados bursátiles seleccionados. Se comienza analizando la serie histórica, comenzando en enero de 2003 y culminando en diciembre de 2010.

Como en esta instancia se pretende estudiar el riesgo de cada mercado, las series estarán expresadas en moneda local.

4.1.2.1. Período 2003-2010

En los gráficos siguientes se observa la evolución de los índices representativos de los mercados americano, alemán, brasilero y argentino (S&P 500, DAX, BOVESPA y Merval, respectivamente).

Gráfico N°24: Evolución de los índices de los mercados seleccionados



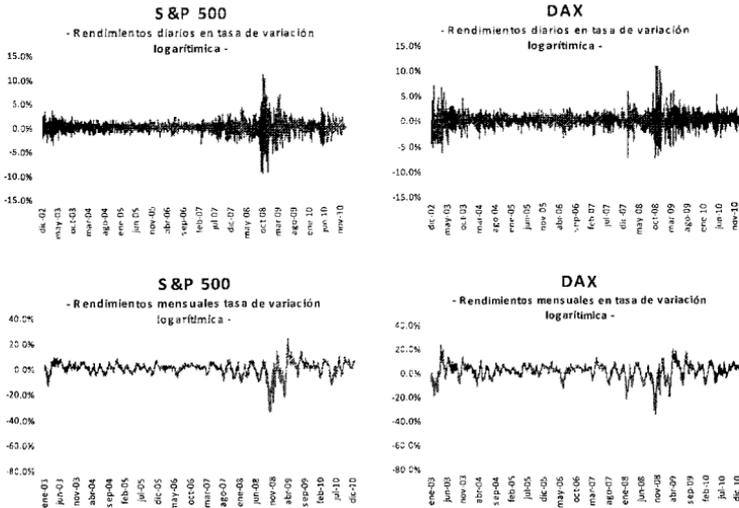
Fuente: Elaboración propia en base a datos de Bloomberg.

En primer lugar desde una perspectiva macroscópica se observa que los cuatros mercados presentan un comportamiento análogo:

- Se da una fase de expansión durante 5 años y medio (desde inicios de 2003 hasta mediados de 2008)
- Aproximadamente hacia septiembre de 2008 se genera una baja abrupta, coincidente con el estallido de la crisis internacional, que se prologa hasta diciembre del mismo año.
- Por último, a partir de 2009 comienza el ciclo de recuperación en todos los mercados, la cual se prolonga tendencialmente durante todo 2010.

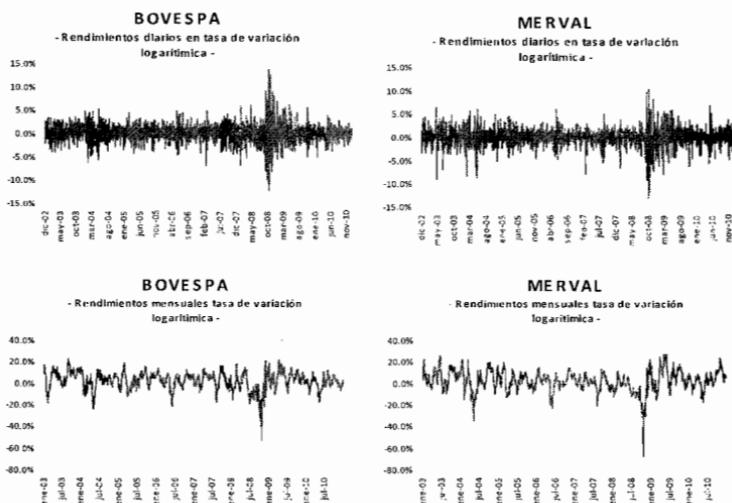
Ahora bien, para comenzar a realizar un análisis descriptivo del riesgo de los mercados analizadas, se estudiarán los rendimientos diarios y mensuales de las series, expresados como tasa logarítmica de variación. Los mismos se grafican a continuación.

Gráfico N°24: Evolución de los rendimientos diarios y mensuales del S&P 500 y del DAX



Fuente: Elaboración propia en base a datos de Bloomberg.

Gráfico N°25: Evolución de los rendimientos diarios y mensuales del BOVESPA y Merval



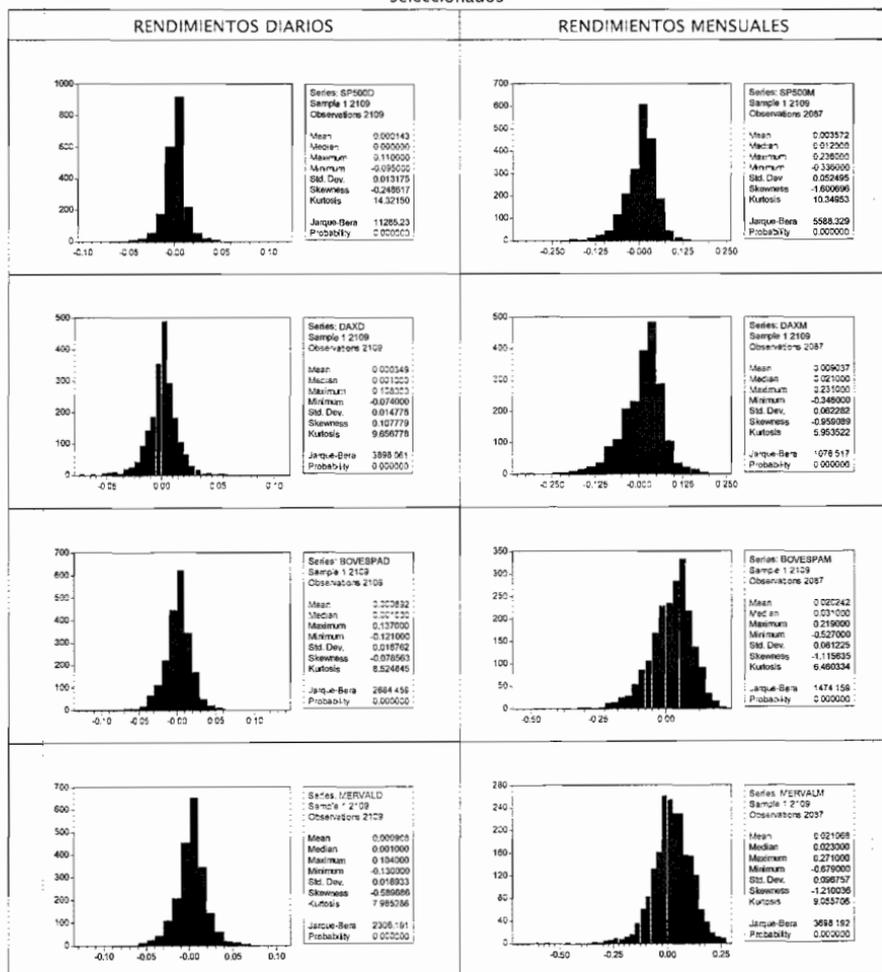
Fuente: Elaboración propia en base a datos de Bloomberg

Nuevamente, en términos macroscópicos, se observa un comportamiento análogo, en el sentido de la convivencia de un periodo de relativa estabilidad durante la primera fase y un altísimo *clustering* durante la crisis.

No obstante, también puede observarse una performance cualitativa diferente entre el los mercados desarrollados y los emergentes: claramente en los índices Bovespa y Merval se aprecia una volatilidad mucho mayor aún durante la fase expansiva, como así también mayor tendencia al *clustering* dicha fase.

En líneas generales, las apreciaciones anteriores son válidas tanto para los rendimientos diarios como para los mensuales.

Gráfico N°26: Distribuciones de los rendimientos diarios y mensuales de los mercados seleccionados



Fuente: elaboración propia en base a datos de Bloomberg

En lo que hace a las distribuciones de probabilidad de las series analizadas, en líneas generales se registra que todas las distribuciones resultan marcadamente leptocúrticas, para todos los mercados y series de retornos (diarios y mensuales).

Respecto a la simetría, todas las series diarias resultan levemente asimétricas hacia la derecha, con la sola excepción del mercado alemán. No obstante, al observar los retornos mensuales, todas las distribuciones resultan marcadamente asimétricas hacia la derecha, dejando en evidencia el peso de la cola izquierda, representativa de las caídas abruptas durante el período de crisis.

Como el estudio está focalizado en el riesgo, y bajo el supuesto de aversión al riesgo, a continuación se estudia la "cola izquierda" de las series analizadas.

Gráfico N°27: Cola izquierda de la distribución de los rendimientos diarios y mensuales del S&P y del DAX

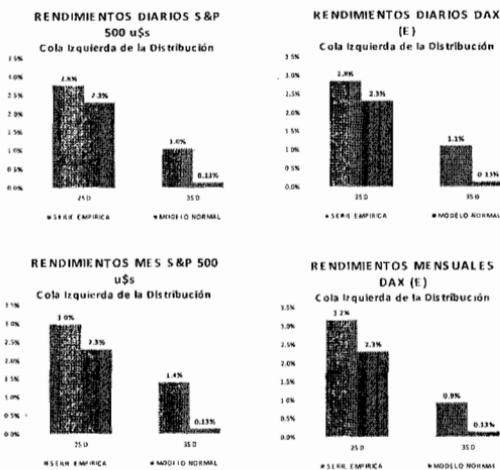
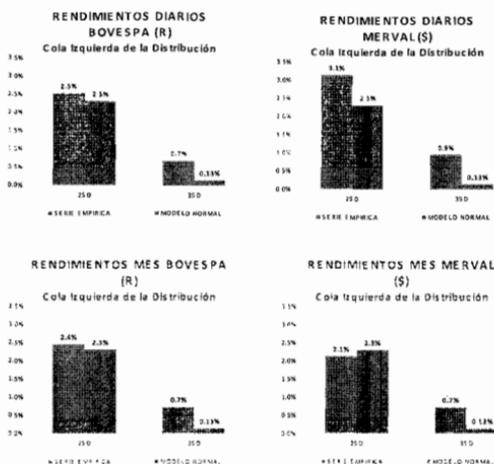


Gráfico N°28 Cola izquierda de la distribución de los rendimientos diarios y mensuales del BOVESPA y Merval



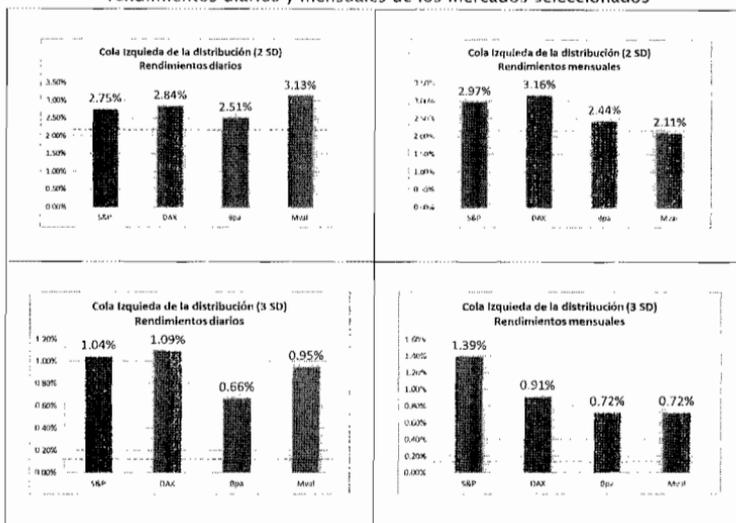
Fuente: elaboración propia en base a datos de Bloomberg

En general se aprecia que en casi todos los casos se registra evidencia a favor de colas pesadas, es decir, que la probabilidad de los eventos extremos (caídas del activo alejadas del rendimiento promedio) es como mínimo más alta que en el modelo normal (distribución de gauss).

Nótese que la mayor discrepancia se da en el extremo. Si bien en casi todos los casos la probabilidad de casos alejados de la media más allá de dos desviaciones estándar es mayor que en el modelo normal, la discrepancia no resulta tan grande (menos aún en términos de inferencia estadística). No obstante, la diferencia en el extremo de la cola (casos más allá de tres desvíos estándar) resulta mucho mayor: en el caso de los rendimientos diarios, entre el 1,1% como máximo y el 0,7% como mínimo de los de las caídas de los índices analizados superaron los tres desvíos estándar, respecto al 0,13% del modelo normal. En el caso los rendimientos mensuales, entre el 1,4% como máximo y el 0,7% como mínimo respecto al 0,13% del modelo normal.

Por otro lado, se observa un hecho que parecería, en principio, un tanto contraintuitivo. La concentración de casos en las colas de las distribuciones resulta mas alejada del modelo normal en el caso de los mercados desarrollados que en los emergentes. Esto puede apreciarse mejor en los gráficos siguientes, en los cuales se reordenan los resultados antes presentados:

Gráfico N°29: Comparación de las colas izquierdas de la distribución de los rendimientos diarios y mensuales de los mercados seleccionados



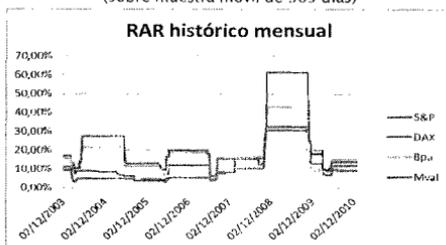
Fuente: elaboración propia en base a datos de Bloomberg

Como fue dicho, en casi todos los casos la probabilidad de eventos extremos resulta menor en los mercados emergentes en las series analizadas. La explicación de este fenómeno es que el quiebre estructural que generó la crisis fue mucho más pronunciada en los mercados desarrollados. En cambio, los emergentes resultan históricamente mucho más volátiles, como pudo apreciarse en las gráficas de los rendimientos antes presentadas. Esto genera que muchos más casos caigan más cercanos a las desviaciones estándar, pero justamente porque estas últimas resultan mucho mayores. Es decir, son mercados sistemáticamente más volátiles aún en la fase de crecimiento, por lo cual las desviaciones en el período de crisis resultaron relativamente menores en comparación al caso de los desarrollados.

Cálculo del *Return at Risk (RAR)*

En el gráfico siguiente se presenta la evolución del RAR histórico mensual sobre una historia de 365 días (la serie representa un indicador móvil de 365 días).

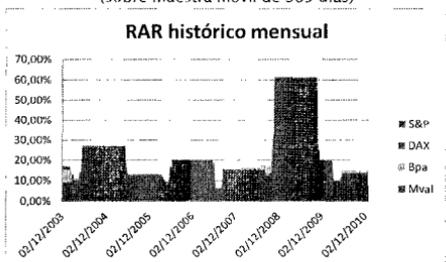
Gráfico N°30: Evolución del RAR histórico mensual de los mercados seleccionados (sobre muestra móvil de 365 días)



Fuente: elaboración propia en base a datos de Bloomberg

En primer lugar, una observación es que el incremento no es parsimonioso sino que se da en forma estrepitosa en un momento determinado. En cuanto a la comparación entre mercados, en casi todos los casos el RAR del índice merval resulta el mayor de los cuatro mercados analizados. Solamente en algunos períodos es superado por el Bovespa, en menos períodos por el DAX y solamente en un caso es superado por el S&P 500. Esto puede verse más claramente en el gráfico siguiente, el cual mide lo mismo que el anterior pero en forma de áreas superpuestas. La que ocupa mayor superficie indica un mayor riesgo medido a través del criterio RAR.

Gráfico N°30 bis: Evolución del RAR histórico mensual (sobre muestra móvil de 365 días)



Fuente: elaboración propia en base a datos de Bloomberg

Debe recordarse que hasta este punto se están analizando las series en moneda local, con lo cual la evolución del algoritmo presentado no es totalmente comparable. No obstante, como fue dicho, en esta sección se está puntualizando en el riesgo mercado.

Por último resta visualizar las correlaciones entre los rendimientos de los mercados seleccionados.

Tabla N°6: Correlaciones diarias entre mercados

	CORRELACIONES DIARIAS			
	S&P 500	DAX	BOVESPA	MERVAL
S&P 500	1	0,61	0,68	0,52
DAX		1	0,53	0,43
BOVESPA			1	0,58
MERVAL				1

Fuente: Elaboración propia en base a datos de Bloomberg.

Tabla N°7: Correlaciones mensuales entre mercados

	CORRELACIONES MENSUALES			
	S&P 500	DAX	BOVESPA	MERVAL
S&P 500	1	0,86	0,74	0,66
DAX		1	0,69	0,59
BOVESPA			1	0,72
MERVAL				1

Fuente: Elaboración propia en base a datos de Bloomberg.

Las correlaciones de los rendimientos diarios no resultan relevantes, no así los rendimientos mensuales. No obstante solo tendrían mayor peso estadístico la correlación entre el S&P 500 y el DAX (0,86) y entre el S&P 500 y el Bovespa (0,74).

Resumen de los dinámicas observadas

En síntesis, los hechos estilizados que se observan en la serie analizada son los siguientes:

- La existencia de heteroscedasticidad
- La existencia de colas pesadas

- La existencia de clustering
- La heterogeneidad en los niveles relativos de volatilidad
- La heterogeneidad en los niveles de riesgo extremo

Nótese que al menos los primeros tres puntos mencionados corresponden a los hechos estilizados que comúnmente se adjudican al comportamiento empírico de los mercados, y que contradicen el modelo del *random walk* bajo distribución normal. Es decir, se verifican la mayoría de las dinámicas que han sido destacadas a lo largo de la literatura y que han sido detalladas en el marco teórico de este trabajo.

Por lo tanto:

- En primer lugar, se rechaza la hipótesis del *random walk* en forma rotunda.
- En segundo lugar, de acuerdo a la dinámica observada, ¿se justificaría la aplicación del enfoque complejo?

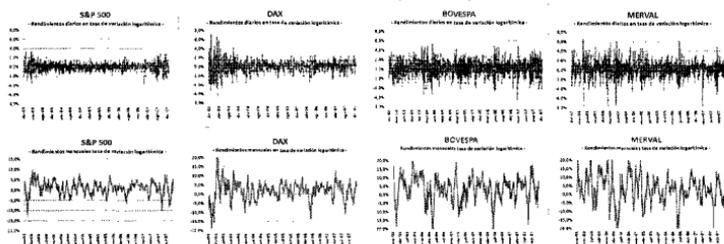
Para responder al interrogante planteado en los puntos siguientes se analizarán los datos con mayor profundidad. En este sentido, el objetivo de esta primera sección fue realizar un análisis descriptivo de la totalidad del período analizado. En el mismo, que va desde inicios de 2003 hasta fines de 2010, se contempla la coexistencia de tres fases bien distinguidas: la fase de crecimiento, la fase de crisis repentina y la fase de recuperación rápida. No obstante, este análisis retrospectivo es válido en términos descriptivos, pero no en términos prospectivos y/o predictivos. Nótese que en los indicadores agregados puede generarse una compensación de los desvíos extremos de la crisis con la recuperación rápida. Para eliminar ese sesgo, en la sección siguiente se replica el análisis para el período pre-crisis y para el período de crisis en forma independiente. El objetivo será evaluar la capacidad de prospectiva de los indicadores de riesgo tradicionales (volatilidad, colas, RAR, etc.) y en función de los resultados obtenidos determinar si se justifica proponer un enfoque alternativo.

4.1.2.2. La situación en el período pre-crisis

A continuación se presentan los rendimientos de los mercados durante el período 2003-2007, siguiendo la misma secuencia de estudio que en el caso previo.

En primera instancia se observa que la evolución es mucho más homogénea y por sobre todo acotada, sin observarse períodos con grandes desviaciones respecto a la evolución promedio de la serie. No obstante, en la comparación entre mercados, se observa que implícitamente los mercados emergentes resultan mucho más volátiles que los desarrollados (nótese cómo la volatilidad aumenta observando las figuras desde izquierda a derecha).

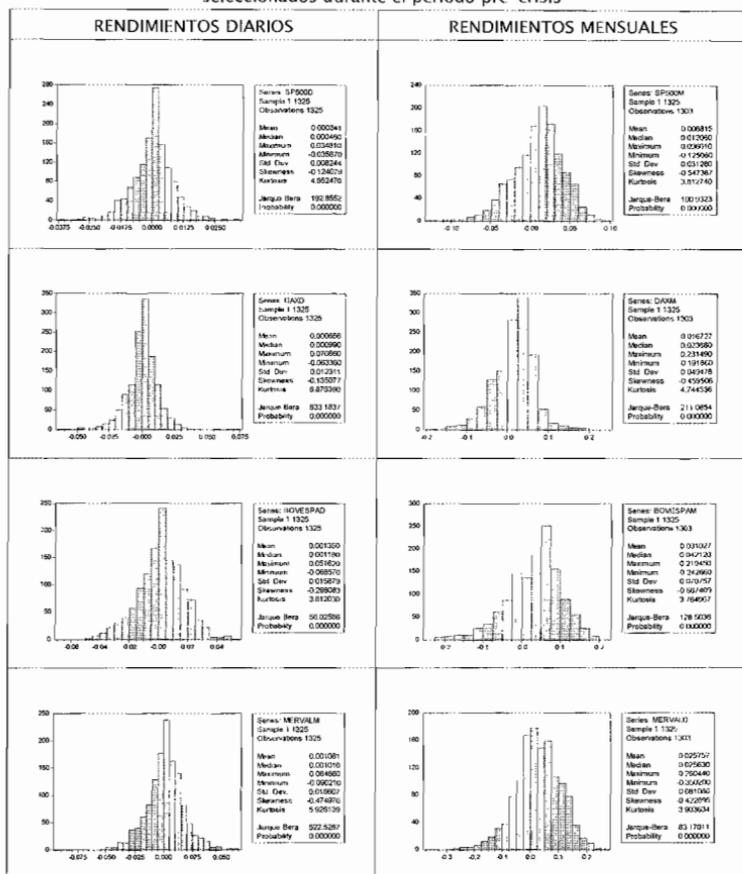
Gráfico N°31: Evolución de los rendimientos diarios y mensuales de los mercados seleccionados durante el período pre-crisis



Fuente: elaboración propia en base a datos de Bloomberg

En los gráficos siguientes se presentan las distribuciones de probabilidad del período analizado (la columna de la izquierda corresponde a los rendimientos diarios y la de la derecha a los mensuales).

Gráfico N°32: Distribución de los rendimientos diarios y mensuales de los mercados seleccionados durante el período pre-crisis

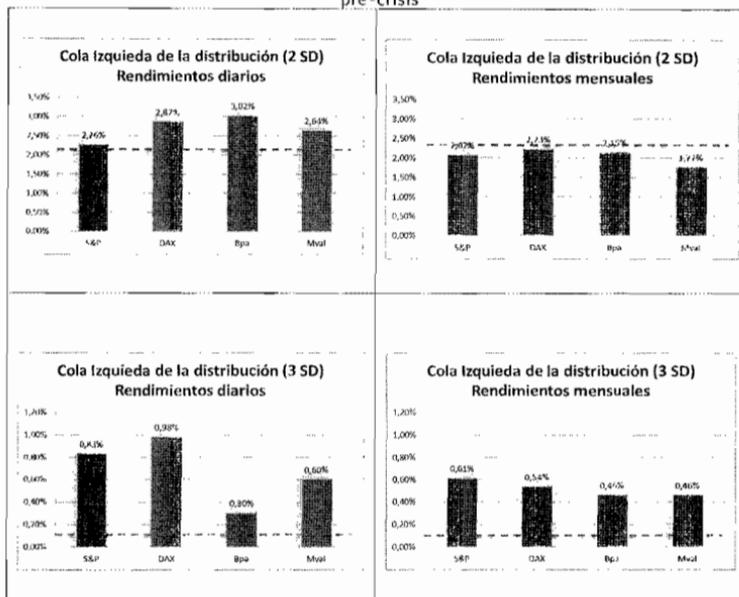


Fuente: elaboración propia en base a datos de Bloomberg

Si bien en todos los casos se registra cierta tendencia a la leptocurtosis y en todos los casos se rechaza el supuesto de normalidad, las distribuciones resultan un tanto más "tradicionales" que en los casos anteriores. Nótese que, al menos en los dos mercados desarrollados, existe mayor nivel de simetría. Asimismo, también son menores los

niveles de curtosis. En cuanto a las colas de las distribuciones, las mismas se analizan a continuación.

Gráfico N°33: Comparación entre colas izquierdas de las distribuciones de los rendimientos diarios y mensuales de los mercados seleccionados durante el período pre-crisis

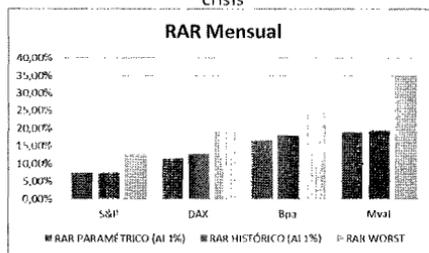


Fuente: elaboración propia en base a datos de Bloomberg

Nótese que en los rendimientos mensuales, los casos que superan los dos desvíos estándar hacia la izquierda, resultan menores que en la distribución normal, demostrando un riesgo menor al de dicho modelo. No obstante, los casos extremos siguen estando presentes aún en el contexto de crecimiento, donde se observa que las desviaciones que superan los tres desvíos hacia la izquierda resultan mayores que en modelo normal (y paradójicamente resultan mayores en los mercados desarrollados respecto a los emergentes). En tanto, la proporción de casos extremos se reduce notablemente.

En cuanto a la estimación del RAR paramétrico mensual (calculado sobre una serie histórica anual), en todos los casos resulta muy similar la medición histórica, incluyendo los emergentes. En tanto, el peor valor de la serie (RAR WOST) resulta muy superior solamente en el caso del Merval.

Gráfico N°34: RAR mensual de los mercados seleccionados durante el período pre-crisis



Fuente: elaboración propia en base a datos de Bloomberg

Respecto a las correlaciones entre mercados, las mismas se presentan en las tablas siguientes.

Tabla N°8: Correlaciones diarias entre mercados durante el período pre-crisis

	CORRELACIONES DIARIAS			
	S&P 500	DAX	BOVESPA	MERVAL
S&P 500	1	0.57	0.60	0.35
DAX		1	0.38	0.23
BOVESPA			1	0.43
MERVAL				1

Fuente: Elaboración propia en base a datos de Bloomberg.

Tabla N°9: Correlaciones mensuales entre mercados durante el período pre-crisis

	CORRELACIONES MENSUALES			
	S&P 500	DAX	BOVESPA	MERVAL
S&P 500	1	0.78	0.65	0.40
DAX		1	0.54	0.32
BOVESPA			1	0.56
MERVAL				1

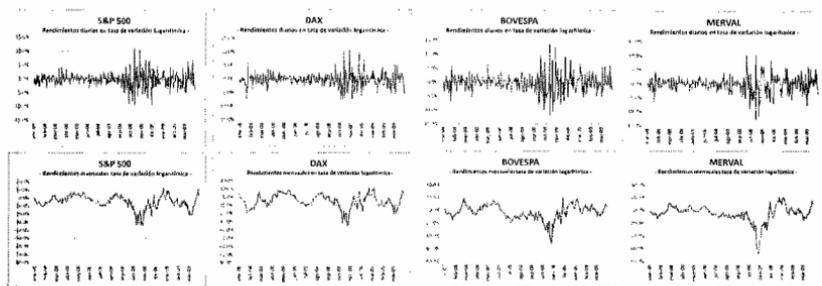
Fuente: Elaboración propia en base a datos de Bloomberg.

Como es habitual, las correlaciones mensuales resultan superiores a las diarias también durante el período de baja volatilidad. No obstante, en términos comparativos con el período total analizado en la sección precedente, las correlaciones bajan significativamente.

4.1.2.3. Período de crisis

A continuación se grafica la evolución de los rendimientos diarios y mensuales durante el contexto de la crisis financiera internacional. El período bajo análisis va desde el 01/01/2008 hasta el 30/03/2009.

Gráfico N°35: Evolución de los rendimientos diarios y mensuales de los mercados seleccionados durante el período de crisis



Fuente: elaboración propia en base a datos de Bloomberg

Claramente se observa un fuerte *clustering* hacia el final de la serie (período septiembre, octubre, noviembre, diciembre 2008), coincidente con el estallido de la crisis¹⁴.

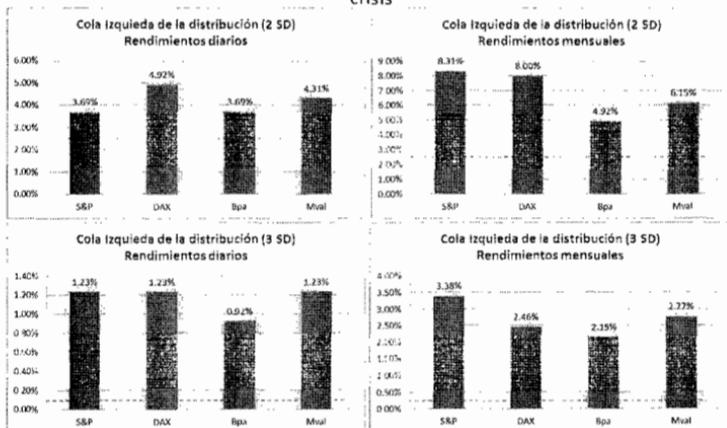
En cuanto a la cola izquierda de la distribución, se observa una marcada tendencia a la ocurrencia de extremos, tanto en los rendimientos diarios como en los mensuales, los

L

¹⁴ Tener presente que los principales problemas se iniciaron el mayo. No obstante, el 6 septiembre los medios de comunicación estadounidenses anuncian la inminente nacionalización de *Fannie Mae* y *Freddie Mac* para proteger el mercado, lo que supondría la mayor intervención gubernamental de la historia de EEUU; el 14 septiembre el *Bank of America* anuncia la compra de *Merrill Lynch* por 44.000 millones de dólares y el de 15 septiembre *Lehman Brothers*, el cuarto banco de inversión del mundo, se declara en quiebra.

cuales superan con creces los límites tradicionales de la distribución normal. Nótese que la cola mencionada resulta relativamente muy pesada (tanto al observar la cantidad de casos relativos que superan los tres desvíos estándar) amén que los valores están calculados con la varianza implícita de la serie (la cual resulta muy superior a la del período analizado previamente).

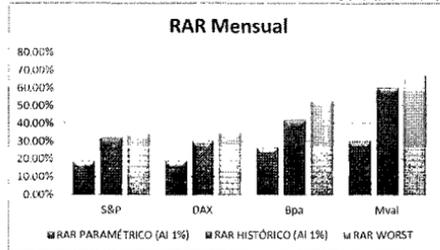
Gráfico N°36: Comparación entre colas izquierdas de las distribuciones de los rendimientos diarios y mensuales de los mercados seleccionados durante el período de crisis



Fuente: elaboración propia en base a datos de Bloomberg

En cuanto a la medición del RAR, además de incrementarse drásticamente respecto al período previo, nótese que la medición del histórico al 99% de confianza resulta muy cercana al peor valor de cada una de los mercados analizados (en el caso del S&P 500 prácticamente coinciden). Esto es otra forma de convalidar la hipótesis del riesgo extremo del período.

Gráfico N°37: RAR mensual de los mercados seleccionados durante el período de crisis



Fuente: elaboración propia en base a datos de Bloomberg

Por último, se observa que las correlaciones entre los rendimientos (tanto diarios como mensuales) se incrementan durante el período analizado.

Tabla N°10: Correlaciones diarias entre mercados durante el período de crisis

CORRELACIONES DIARIAS				
	S&P 500	DAX	BOVESPA	MERVAL
S&P 500	1	0.61	0.73	0.61
DAX		1	0.64	0.58
BOVESPA			1	0.74
MERVAL				1

Fuente: elaboración propia en base a datos de Bloomberg

Tabla N°11: Correlaciones mensuales entre mercados durante el período de crisis

CORRELACIONES MENSUALES				
	S&P 500	DAX	BOVESPA	MERVAL
S&P 500	1	0.91	0.82	0.78
DAX		1	0.80	0.73
BOVESPA			1	0.89
MERVAL				1

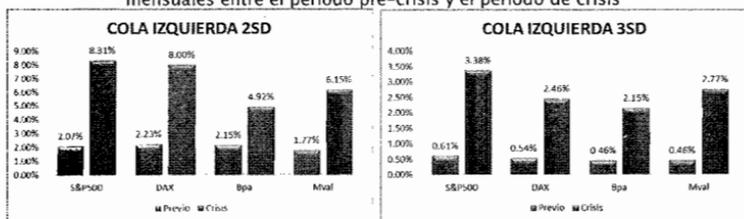
Fuente: elaboración propia en base a datos de Bloomberg

En la sección siguiente se resumirá una comparación entre períodos, a los fines de observar la discrepancia entre las estimaciones del riesgo del período "normal" y los verificados durante la crisis.

4.1.2.4. Comparación: contexto previo y crisis¹⁵

En los gráficos siguientes se comparan el peso de la cola izquierda de la distribución de los retornos mensuales entre el período previo (2003-2008) y el período de crisis (2008-2009). Como se observa, la discrepancia es muy grande en todos los mercados, pasando en promedio de un 2% de casos que superan los dos desvíos estándar en el período previo a la crisis a entre el 4.92% (Bovespa) y el 8.13% (S&P500) de los casos durante la crisis. La discrepancia es aún más marcada si se observan los casos que superan los tres desvíos estándar.

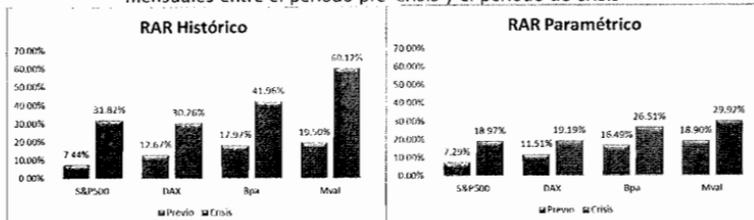
Gráfico N°38: Comparación de las colas de la distribución de los rendimientos mensuales entre el período pre-crisis y el período de crisis



Fuente: elaboración propia en base a datos de Bloomberg

En tanto, la estimación del RAR también resulta marcadamente superior durante la crisis, tanto en el caso del histórico como del paramétrico. La diferencia en la estimación histórica es la más marcada, siendo la medición durante la crisis entre 3 y 4 veces superior a la correspondiente al período normal.

Gráfico N°39: Comparación de las colas de la distribución de los rendimientos mensuales entre el período pre-crisis y el período de crisis

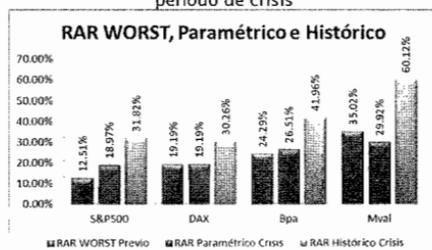


Fuente: elaboración propia en base a datos de Bloomberg

¹⁵ A los fines de sintetizar el análisis, se analizarán solamente los rendimientos mensuales.

El gráfico siguiente describe hasta qué punto las estimaciones del periodo previo resultan insuficientes para caracterizar el riesgo asumido durante la crisis. En el mismo se compara el RAR con el peor caso de la historia previa (RAR WORST del período previo a la crisis) con las estimaciones durante crisis. Nótese que ni el peor caso de la historia previa fue suficiente para tomar como referencia el riesgo iba a asumirse, sobre todo respecto al RAR histórico de la crisis.

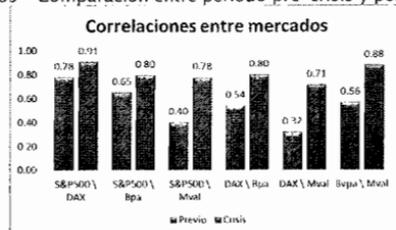
Gráfico N°40: RAR worst del periodo pre-crisis y RAR paramétrico e histórico del periodo de crisis



Fuente: elaboración propia en base a datos de Bloomberg

Por último, como fue dicho, las correlaciones de los rendimientos mensuales de los mercados analizados se incrementan durante el período de crisis respecto al contexto previo. Nótese que la relación es muy marcada sobre todo en los mercados que tradicionalmente tienen muy baja correlación durante los períodos normales, como el S&P500 y el merval o el DAX y el merval, que pasan de 0.4 a 0.78 y de 0.32 a 0.71, respectivamente.

Gráfico N°41: Correlación de los rendimientos mensuales de los mercados seleccionados - Comparación entre periodo pre-crisis y periodo de crisis



Fuente: elaboración propia en base a datos de Bloomberg

En síntesis, la principal conclusión de este análisis es que, en la sub-muestra analizada, las medidas tradicionales de estimación del riesgo fueron totalmente obsoletas para proyectar lo acaecido durante la crisis. Nótese que hasta la peor medición del contexto normal subestimó el comportamiento promedio de los desvíos de la crisis. Puede afirmarse entonces que los métodos estadísticos tradicionales, dependientes la historia reciente, subestimaron sistemáticamente el riesgo de los mercados durante el proceso de la crisis financiera internacional.

Asimismo, no se observan grandes diferencias respecto a los resultados alcanzados en el relevamiento agregado del mercado mundial, al margen de algunas particularidades esperables (mayores niveles de curtosis y extremos en todos los mercados) y otras no esperables (mayor tendencia a la normalidad en la serie total en los mercados emergentes dado la alta volatilidad implícita en toda la serie).

4.1.2.5. Indicadores Evolutivos

Para testear que las conclusiones precedentes no sean adjudicadas específicamente a los tres segmentos temporales fijados, a continuación se presentan los indicadores antes calculados en forma evolutiva, es decir, tomando un horizonte móvil anual, el cual se va desfasando en forma diaria hasta la finalización de serie temporal analizada. En el caso de este estudio, la serie va desde el 01/01/2003 hasta el 31/12/2010.

Correlaciones de los rendimientos

Las correlaciones sobre los rendimientos mensuales tienen un comportamiento bastante errático. Disminuyen y se mantienen en niveles relativos bajos durante el período de normalidad y se incrementan y alcanzan máximos absolutos y relativos durante la crisis. Esta dinámica es aún más marcada en los mercados tradicionalmente menos correlacionados, donde el coeficiente se eleva rápidamente durante la crisis.

Gráfico N°42: Correlación móvil de los rendimientos mensuales del S&P respecto al resto de los mercados seleccionados



Fuente: elaboración propia en base a datos de Bloomberg

Evolución de la volatilidad

Por otro lado, si se mira la evolución de la volatilidad, va en baja desde el inicio de la serie hasta alcanzar un mínimo hacia agosto de 2007 en todos los mercados. A partir de allí comienza una tímida fase ascendente hasta subir en forma abrupta a partir de agosto 2008. Pero nótese que no se observa transición alguna, en el sentido que durante el año y los meses previos a agosto de 2008 la volatilidad ni siquiera había superado los máximos de la serie, y en cuestión de días se incrementó a niveles exorbitantes.

Gráfico N°43: Desvío estándar móvil de los rendimientos mensuales del S&P respecto al resto de los mercados seleccionados

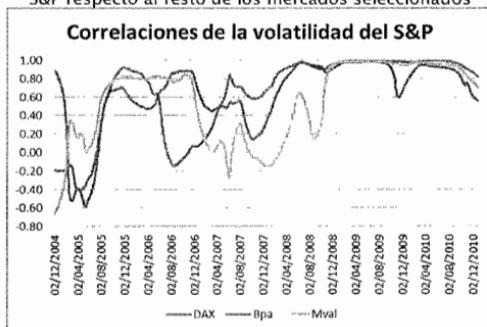


Fuente: elaboración propia en base a datos de Bloomberg

Correlación de la volatilidad

En el cuadro siguiente se presentan las correlaciones de los tres mercados (DAX, Bovespa y Merval) respecto al S&P500. Nótese que durante el período normal las correlaciones de la volatilidad se comportan en forma totalmente errática, incluso siendo negativas durante algunos períodos. No obstante, durante la crisis alcanzan máximos históricos, llegando a ser prácticamente del 100% en todos los mercados (obsérvese la medición entre agosto de 2008 y agosto de 2009).

Gráfico N°44: Correlación móvil del desvío estándar de los rendimientos mensuales del S&P respecto al resto de los mercados seleccionados

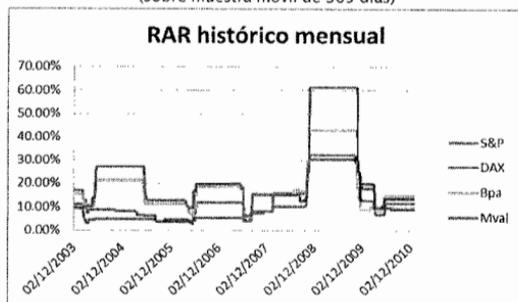


Fuente: elaboración propia en base a datos de Bloomberg

Return at Risk

Por último, una situación similar (en cuanto al aumento abrupto) se da en la medición móvil del RAR (histórico). Si bien es un indicador mucho más robusto, durante el año y los meses previos al estallido de la crisis se mantiene un nivel mínimo relativo en todos los mercados, para luego incrementarse en forma abrupta en cuestión de días.

Gráfico N°45: Evolución del RAR histórico mensual de los mercados seleccionados
(sobre muestra móvil de 365 días)



Fuente: elaboración propia en base a datos de Bloomberg

En síntesis, se ha verificado lo siguiente:

- La estimación del riesgo realizada desde la óptica de los métodos estadísticos tradicionales estimados sobre la base de información histórica genera una profunda subestimación del riesgo en el caso de estudio analizado.
- La subestimación no depende del rango de datos seleccionados, sino que el riesgo medido a través de la volatilidad, la sensibilidad (correlaciones), la ocurrencia de eventos extremos (colas de la distribución) y el RAR, se incrementa en forma explosiva, ostentando una dinámica totalmente desvinculada al contexto previo (emergencia).

Por lo tanto, respondiendo al interrogante planteado al inicio de la sección, en vistas de la evidencia irrefutable es totalmente justificable aplicar un enfoque alternativo a la estimación del riesgo.

Frente a esto existen dos caminos:

- a. Aplicar todo el instrumental estadístico que corrige las estimaciones planteadas, como por ejemplo los modelos GARCH (Engle, 1982), la aplicación del movimiento browniano fraccional (Mandelbrot, 1960), la aplicación de la distribución del Levy (Mandelbrot, 1960 y Taleb, 2002), etc.
- b. Aplicar el enfoque generativo.

Si se opta por "a" se estarían haciendo las correcciones pertinentes sin cambiar la visión del enfoque, en virtud que se estaría buscando el mejor ajuste de las series en

forma *ex-post*, es decir, sobre un horizonte histórico realizado. En principio, el enfoque estadístico hace abstracción de la estructura del mercado, tratando de buscar la explicación de las grandes desviaciones a través de la identificación de *shocks* exógenos.

Si se opta por "b", se está presuponiendo que lo que genera la dinámica es fruto de la intrincada estructura del mercado, en el marco de la existencia de agentes heterogéneos en interacción.

Para justificar la opción "b", sería necesario observar la estructura del mercado. Por ello, en el punto siguiente se realiza un breve estudio exploratorio acerca de algunas características observadas en el mercado mundial, especialmente en el prelude de la crisis financiera internacional.

4.1.3. La estructura del mercado de capitales

Hace no mucho más de 30 años atrás, el movimiento internacional de capitales estaba determinado por las acciones de los organismos multilaterales (BM, FMI, BID, etc.) y de los estados soberanos. La volatilidad de los mercados era baja, con tipos de cambio estables en el marco del patrón oro y donde las tasas de interés no sufrían grandes cambios (por ejemplo, la tasa de interés de Inglaterra se mantuvo relativamente constante a lo largo de un período de 100 años). Dentro de tal contexto, los instrumentos financieros eran, al menos comparados con los actuales, bastante simples.

Actualmente, el movimiento internacional de capitales está básicamente determinado por las acciones de los fondos comunes de inversión. Contrariamente al contexto antes descrito, los tipos de cambio son generalmente flotantes, presentando variaciones continuas, las tasas de interés cambian a menudo y en muchas ocasiones en forma casi estrepitosa, por lo cual, la principal característica de los mercados financieros contemporáneos es la volatilidad.

En tanto, la variedad de objetivos y cantidad de jugadores entre los fondos comunes de inversión hace que, en el marco de la globalización, la demanda de capitales sea una variable difícil de proyectar y que los flujos de capitales se comporten con dinámicas difíciles de predecir. Como mínimo, para dar un primer paso en la comprensión de tales dinámicas, debe saberse "quién" está detrás de cada fondo, esto es, cuáles son los objetivos declarados por cada fondo y cuáles son las estrategias que aplican sus administradores. A modo de ejemplo, y para poner dos casos polares:

- Inversores institucionales que desarrollan estrategias conservadoras y con horizontes de largo plazo.
- *Hedge Funds (HF)* que en general desarrollan estrategias propensas al riesgo y con horizonte de corto plazo.

Otro elemento que resulta importante diferenciar para comprender más profundamente las dinámicas endógenas del mercado de capitales es la frecuencia de revisión de las posiciones de cada perfil de inversor. Los *Hedge Funds* revisan en forma casi continua sus colocaciones, incluso rearmándolas dentro de un mismo día, con el objetivo de perseguir ganancias de capital. Contrariamente, compañías de seguros de vida implementan estrategias de mediano-largo plazo, revisando las posiciones cada 6 meses o un año. Asimismo, los fondos de pensiones de beneficio definido tradicionalmente revisan sus colocaciones cada año o cada tres años. En el caso de los fondos de contribución definida, las estrategias de inversión y revisión pueden ser muy diversas, dependiendo de las necesidades de la inversión y de la "cultura" del inversor individual (por ejemplo *benchmarking* vs. *Absolute return focus*). (FMI, GFSR, 2008).

En tanto, los bancos centrales suelen focalizarse privilegiando la liquidez y aplicando políticas conservadoras (generalmente adquiriendo activos *investment-grade*).

¿Cambios de comportamiento?

No obstante, según el FMI (2008), en los últimos años y hasta el estallido de la crisis *subprime*, se han observado importantes cambios de tendencias: inversores institucionales han invertido en *Hedge Funds* como medio para obtener mayor rentabilidad, incluso exponiéndose a volatilidades externas (como por ejemplo, el riesgo cambiario). El período de bajos rendimientos (generado por las bajas tasas de interés en EEUU) indujo un cambio de comportamiento en este tipo de inversores, quienes comenzaron a buscar rendimientos extraordinarios ("*alfa*"). Esto generó que inversiones de riesgo e instrumentos alternativos entren gradualmente a portafolios antes "conservadores", permitiendo el acceso de los mismos a estrategias tales como el uso del apalancamiento (incluso a través de derivados), ventas "a corto", la exposición a nuevos activos (como por ejemplo *commodities*) y la inversión en activos menos líquidos (deuda privada y mercado inmobiliario) con el objetivo de optimizar la posición riesgo-retorno de tales portafolio (FMI, GFSR, 2008).

Otro factor que genera cambios de dinámica "natural" o conocida del movimiento internacional de capitales es la "entrada" de nuevos jugadores (como por ejemplo gobiernos de mercados emergentes y fondos de riqueza soberana) producto del

crecimiento de las reservas internacionales de muchos países en los últimos años. De esta forma, muchos gobiernos se han convertido en grandes inversores de instrumentos financieros, principalmente bonos y *equity*. Se estima que este tipo de fondos administran carteras que superarían los \$1,4 trillones de dólares, en su mayoría provenientes de países petroleros (FMI, GFSR, 2008).

En el caso de los Bancos Centrales, se ha observado que las estrategias de inversión se han desviado del denominado "hábitat preferido". La combinación del incremento en los niveles de reservas con proyecciones de reducción de déficits fiscales ha generado que la colocación de reservas se oriente hacia activos con compensaciones de riesgo-retorno y que se diversifiquen los portafolios mediante la inclusión de nuevos activos, dejando atrás bonos del tesoro americano e incorporando *securities* garantizadas en hipotecas americanas, "US agency debt"¹⁶ y otros activos nominados en dólares tales como bonos corporativos (con alta calificación) y deuda soberana *investment grade* de países emergentes.

En síntesis, previo al estallido de la crisis *subprime*, la combinación de todo un conjunto de factores llevó a que se funda el perfil o estrategias clásicas de los principales actores que marcan la evolución y las tendencias en el flujo internacional de capitales. La profundidad de los sistemas financieros desarrollados y la sofisticación de los instrumentos financieros, llevó a que los portafolios de inversión, aun de los inversores tradicionalmente "conservadores", incluyan altos riesgos específicos, devenidos de la búsqueda de rentabilidad en el marco de un período de bajas tasas de interés (Garnica y Thomasz, 2008).

Mercado primario y mercado secundario

En tanto, cabe introducir otra dimensión muy importante en la estructura y dinámica de mercado internacional de capitales. Básicamente, existen dos circuitos:

- El circuito primario, dado por los mercados desarrollados, con una gran profundidad financiera, niveles moderados de volatilidad y menores posibilidades de arbitraje
- El circuito secundario, dado por los mercados emergentes, con limitada profundidad, altos niveles de volatilidad y grandes oportunidades de arbitraje (posibilidad de usufructuar cuasi rentas por períodos más largos).

L

¹⁶ Deuda emitida por instituciones privadas bajo la tutela del gobierno de EE.UU., pero sin garantías de este último. Para brindar un ejemplo reciente, los *securities* emitidos por *Fannie Mae* y *Freddie Mac* son considerados *US agency debt*.

Cabe destacar que, a excepción de lo acaecido recientemente ante el estallido de la crisis *subprime* en el mercado americano, el circuito primario tiende a ser más estable y predecible. En cambio, el circuito secundario está expuesto a un *mix* de períodos de estabilidad combinados con "*clusters*" de altísima volatilidad, producto tanto de shocks exógenos (crisis en el mercado mundial) como también de dinámicas endógenas. Para citar un ejemplo doméstico, la caída en el precio de los bonos soberanos argentinos en agosto de 2008, fue una crisis interna (no se observó tal depreciación en los soberanos "vecinos") provocada tanto por un shock exógeno (venta de los bonos por parte de los bancos venezolanos, con el fin de aprovechar la ganancia contable generada por la existencia de tipos de cambio paralelos en dicho país) pero también por señales estrictamente internas (endógenas), siendo una de ellas la intervención del "INDEC".

4.1.4. Modelo de Simulación

En los dos puntos precedentes se justificó la aplicación del enfoque generativo por una doble vía: (i) por la evidente complejidad¹⁷ de las series de tiempo analizadas y (ii) por la complejidad¹⁸ de la estructura del mercado que generó dicha serie de tiempo.

Por lo tanto, en este punto se presenta un breve modelo de simulación del mercado de capitales, a los fines de cerrar la primer propuesta de este trabajo, es decir, tratar al caso de estudio como sistema complejo y analizarlo desde el enfoque generativo. Se intentará principalmente evaluar la hipótesis de si resulta posible emular el comportamiento empírico de las series de precios a través de reglas de comportamiento sencillas en el marco de un modelo de agentes heterogéneos.

Modelo generativo del mercado de capitales

La configuración es la siguiente:

- Intervienen dos agentes en el mercado: fundamentalistas y *chartistas*.
- La afectación del precio del activo se vincula al exceso de demanda agregada del mercado (a través de un coeficiente de ajuste) compuesta por los excesos de demanda de ambos agentes.

L

¹⁷ Intensidad, *clustering*, etcétera, definida en el sentido de Day (1994) y Chiang (2007).

¹⁸ Agentes heterogéneos, interacción, adaptación (cambios de comportamiento).

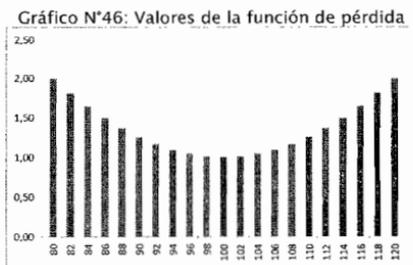
- La demanda de los fundamentalistas sigue la siguiente regla: depende de la desviación del precio observado respecto al precio fundamental. Cuanto mayor es la desviación, con mayor intensidad actúa en el mercado.
- La demanda de los *chartistas* se basa en la simple regla de observar la tendencia del mercado, donde la cuantía de la misma surge de la diferencia entre el valor observado del precio y el promedio de los últimos períodos.
- Por otro lado, para que el modelo no sea totalmente endógeno, se introduce "ruido". En este caso, se adiciona una variable aleatoria (con distribución normal) a la demanda de los *chartistas*. Es decir, los mismos siguen una regla y al mismo tiempo una porción de la demanda es aleatoria.

Las ecuaciones del modelo se presentan a continuación:

Demanda inversores fundamentalistas:

$$D_{fd}(P_t) = \alpha(P^* - P_t)f(P_t)$$

Función potenciadora de la fuerza de la demanda respecto al precio fundamental:



Fuente: elaboración propia

Demanda inversores chartistas:

$$D_{cd}(P_t) = \beta(P_t - \bar{P}) + \varepsilon_t$$

con $\varepsilon_t \sim N(0,1)$

$$\bar{P} = \frac{P_{t-1} + P_{t-2} + P_{t-3}}{3}$$

Movimiento del precio:

$$P_{t+1} - P_t + \gamma D_T(P_t)$$

Simulaciones

A continuación se presentan una simulación del modelo, alargando paulatinamente el número de iteraciones a los fines de observar el comportamiento de corto, mediano y largo plazo del sistema.

Gráfico N°47: Simulación de la evolución del precio

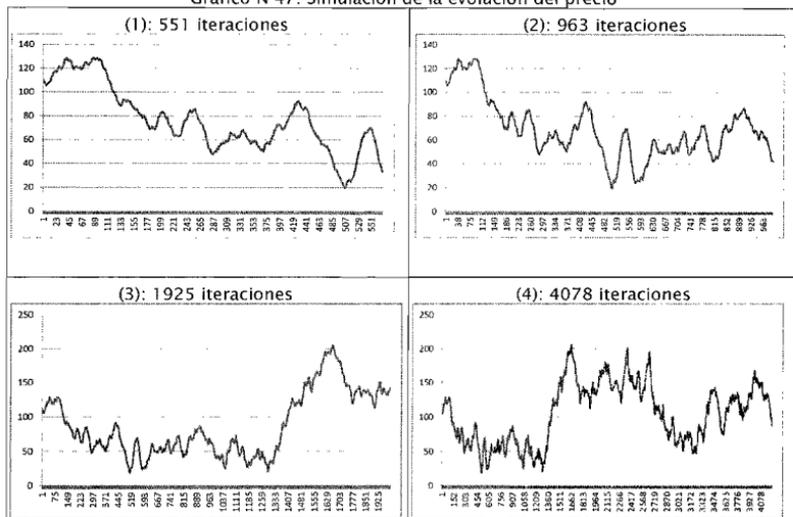
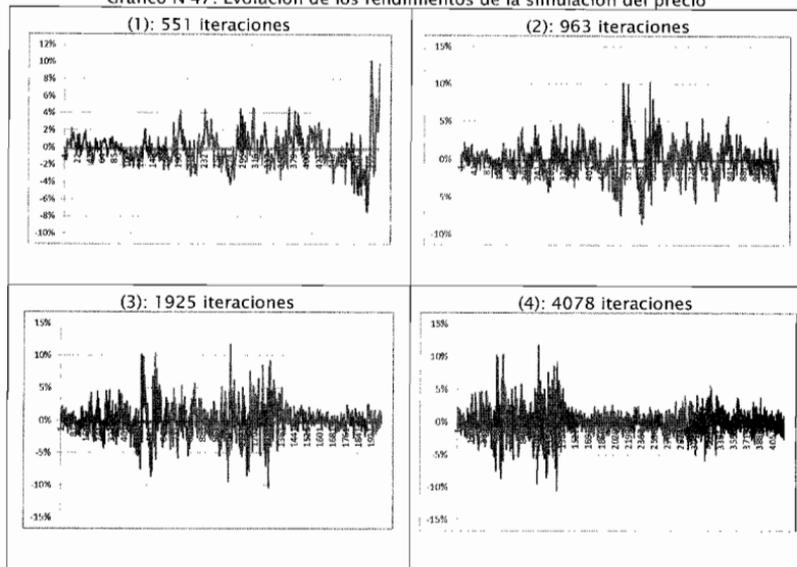


Gráfico N°47: Evolución de los rendimientos de la simulación del precio



Fuente: elaboración propia

Nótese que la forma de los rendimientos se asemeja con creces al caso real, evidenciando *clustering* de volatilidad y eventos extremos.

El seteo de los parámetros

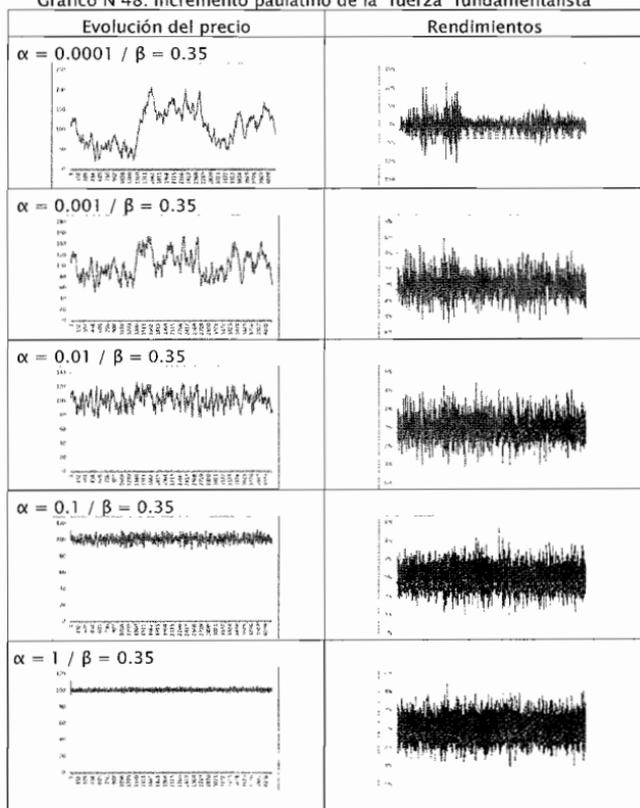
Hasta el momento se ha mostrado que existe la posibilidad de replicar mediante una simulación el comportamiento de un mercado bursátil, contemplando las principales características cualitativas que fueron observadas en el caso empírico.

Ahora bien, una de las principales potencialidades del enfoque generativo no radica solamente en la capacidad de replicar sino sobre todo en la potencialidad que tenga el modelo para evaluar diferentes escenarios mediante el seteo de los parámetros del mismo. También es deseable que este tenga cierta coherencia teórica entre la asignación de valores a los parámetros y la forma de las trayectorias resultantes.

Los principales parámetros de control del modelo es la fuerza de demanda de los fundamentalistas y de los *chartistas*. Esto representa el nivel de intensidad con el cual cada grupo de agentes coacciona en el mercado e induce a un movimiento ulterior en el precio.

A tales efectos, a continuación se presenta una secuencia de alteraciones, donde solamente se incrementa paulatinamente la fuerza de intensidad de los fundamentalistas, manteniendo fija la intensidad de los *chartistas*.

Gráfico N°48: Incremento paulatino de la "fuerza" fundamentalista

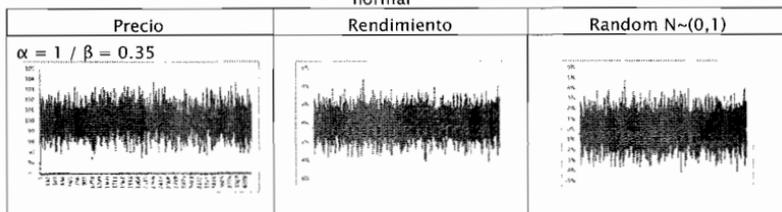


Fuente: elaboración propia

Se observa que, a medida que se incrementa la intensidad de la fuerza de demanda de los fundamentalistas, el modelo deja paulatinamente de generar subas y bajas abruptas en el precio. En el último caso, el modelo pasa a converger al valor

fundamental, y las desviaciones observadas respecto al mismo son generadas estrictamente por el ruido, es decir, por la variable aleatoria incluida en el modelo. Esto puede observarse con mayor detalle en la figura siguiente, donde se grafica la evolución del precio con un coeficiente alfa unitario, los rendimientos de dicha trayectoria y por último una variable aleatoria normal estandarizada. Las semejanzas entre los tres procesos son contundentes.

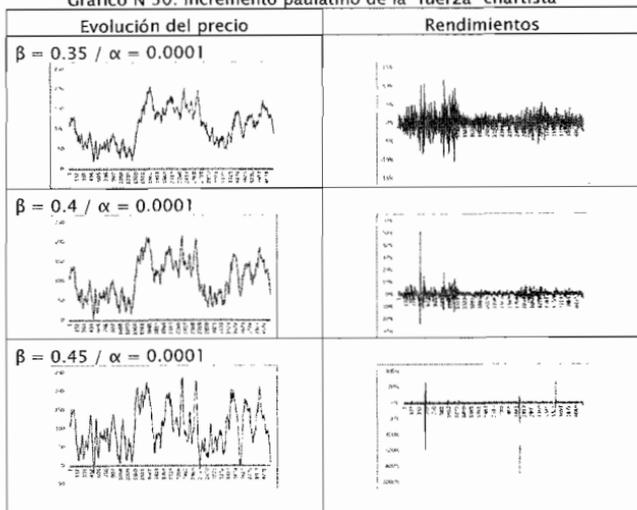
Gráfico N°49: Comparación entre intensidad fundamentalista extrema y el modelo normal

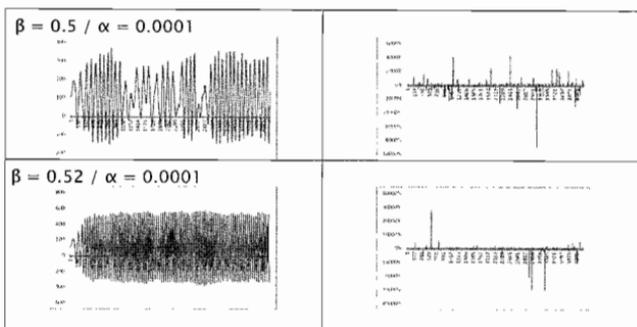


Fuente: elaboración propia

A continuación se repite el mismo procedimiento pero en este caso incrementando en forma paulatina la intensidad de la fuerza de demanda de los chartistas.

Gráfico N°50: Incremento paulatino de la "fuerza" chartista





Fuente: elaboración propia

En este caso, el incremento paulatino de la intensidad chartista se traduce en un incremento paulatino de la brecha entre las subas y las bajas, siendo la misma cada vez más extrema. En el último caso, la trayectoria genera un ciclo que fluctúa entre la suba y la baja extrema en forma permanente.

Comentarios preliminares respecto al comportamiento del modelo

En primer lugar, los resultados de ambas secuencias determinan que a priori la arquitectura del modelo es correcta, en el sentido que los cambios inducidos en los parámetros generan los resultados comúnmente esperados. Es decir, si se ensayan casos extremos libres de componentes estocásticos, la intensidad extrema de los fundamentalistas lleva a la convergencia al valor fundamental, y la intensidad extrema de los chartistas lleva a la generación de un ciclo límite en torno al valor fundamental.

En cuanto al comportamiento del modelo dentro de valores paramétricos no extremos, se generan trayectorias a priori similares a las series empíricas (esto será comparado en el título siguiente). Esto es generado por dos efectos: en primer lugar se debe al pluralismo cognitivo, traducido en este caso en la existencia de dos agentes que aplican diferentes esquemas de decisión. Este punto es generalmente aceptado como indispensable para la generación de burbujas de precios, mayormente inducidas por el comportamiento tendencial del conjunto de agentes comúnmente denominados chartistas. En este sentido Karino y Kawagoe (2009) concluyen que para la generación de burbujas de precio es necesario que los agentes sigan la teoría prospectiva (en el marco de un modelo al estilo de Ball y Holt (1998)). Si se sigue solamente la teoría de la utilidad esperada el precio siempre converge a su valor fundamental.

El segundo efecto es la influencia de la variable aleatoria. Vale destacar que la misma es una componente fundamental en el resultado del modelo. Es decir, de no ser incorporada, el modelo difícilmente genere dinámica emergente (converge o diverge). Es decir, son las pequeñas perturbaciones aleatorias las que "sacan" a la variable de su

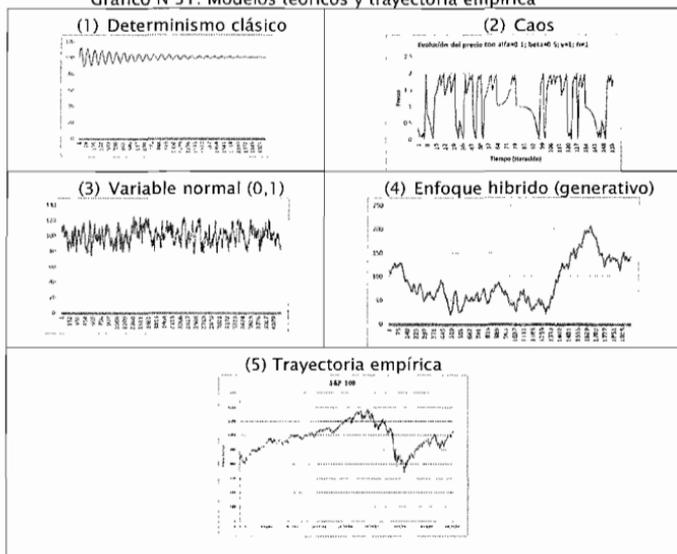
sendero natural y generan nuevas tendencias gracias a la acción de los chartistas. En definitiva, si bien el ruido es lo que en última instancia "mueve" al modelo, genera propagaciones interesantes, dado que un ruido gaussiano termina generando *clustering* y colas pesadas dada la estructura del modelo.

Desde esta perspectiva, las colas pesadas que generalmente se verifican en las distribuciones de los precios de los activos no estarían reflejando una característica análoga en el proceso de generación de información, sino que se estaría atribuyendo a patrones vinculados a la especulación. Expresado de otra manera: incluso en el caso que la información venga dada por una función de probabilidad con distribución normal, el proceso del mercado puede transformar la forma gaussiana del cambio en los *fundamentals* en una distribución de colas pesadas en los rendimientos (Lux, 1998).

Selección de modelos

A continuación se grafican las trayectorias teóricas de un puñado de modelos y por último las trayectorias empíricas de las serie de índices bursátiles. El interrogante que se intenta responder es cuál de las visiones teóricas mejor representa la evolución empírica del fenómeno estudiado.

Gráfico N°51: Modelos teóricos y trayectoria empírica

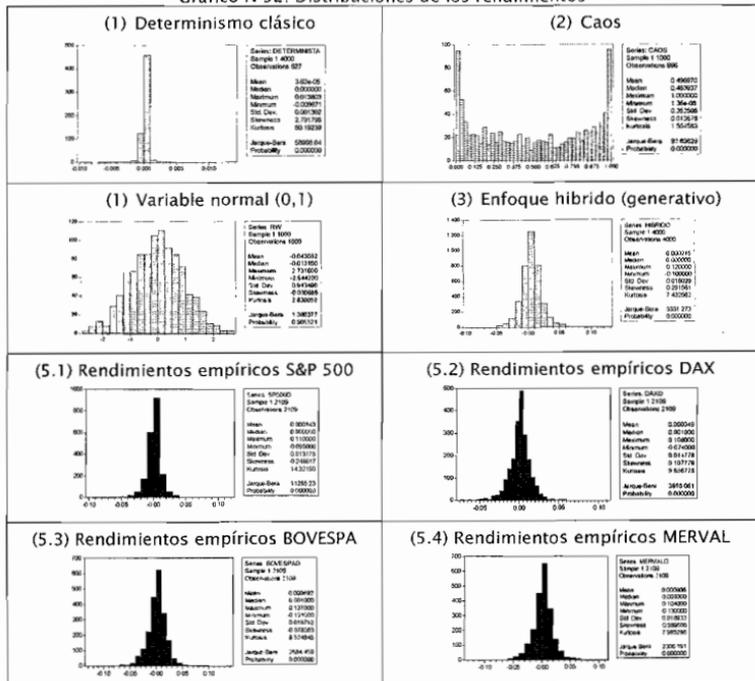


Fuente: elaboración propia

El primer modelo es puramente determinista y grafica un caso (convergente) de dinámica endógena. El modelo (2) representa una trayectoria generada por un modelo puramente caótico, donde se observa aperiodicidad y acotamiento de largo plazo. La trayectoria (3) es generada por un modelo puramente estocástico, en este caso, una variable aleatoria con distribución normal. El modelo (4) es la trayectoria generada mediante el enfoque híbrido propuesto. Por último, en (5) se observa la evolución empírica del S&P 500.

Claramente el modelo (4) emula, por lejos, la trayectoria que más se corresponde con la gráfica de la evolución empírica. No obstante, para hacer abstracción de la escala de cada modelo, a continuación se comparan las propiedades estadísticas de la variación de cada serie. Principalmente se observará la distribución de los rendimientos (en las aplicaciones financieras generalmente se buscan semejanzas estadísticas en la serie de los rendimientos, independientemente de la forma de la serie analizada en nivel).

Gráfico N°52: Distribuciones de los rendimientos



Fuente: elaboración propia

Al analizar la distribución de los rendimientos, se observa lo siguiente:

1. El modelo determinista clásico genera una distribución de rendimientos totalmente apuntalada en torno de la media, producto de haber escogido una trayectoria convergente al valor fundamental.
2. El modelo caótico ostenta una distribución de rendimientos totalmente extrema, apuntalada en las colas y con una probabilidad relativamente estable en todo el recorrido intermedio, incluyendo a la media.
3. Es una distribución de rendimientos coincidente con la distribución normal. Este caso es trivial, dado que de antemano se generó una simulación numérica con dicha distribución.
4. Por último, el enfoque híbrido genera una distribución de rendimientos leptocúrtica con colas pesadas. Nótese que la misma resulta muy similar a las cuatro distribuciones empíricas presentadas (5.1, 5.2, 5.3 y 5.4), correspondientes a la sub-muestra desarrollada en el relevamiento realizado.

Síntesis y conclusiones preliminares

En primer lugar, se ha arribado a la configuración de un modelo basado en agentes que presenta dos puntos a favor: (i) consistencia interna y (ii) consistencia empírica.

- i. La consistencia interna viene dada por la correspondencia entre los resultados del modelo ante variaciones de los parámetros de control y lo esperado en términos teóricos.
- ii. La consistencia empírica consta del hecho que, para una configuración específica de los parámetros de control, el modelo emula con mucha aproximación las series empíricas de los mercados financieros, sobre todo al observar las propiedades estadísticas de la serie de rendimientos.

En tanto, un punto fundamental vinculado a la arquitectura del modelo es el planteo de un enfoque híbrido. Es decir, para el estudio de fenómenos económicos en general, y financieros en particular, no sería recomendable asumir que los modelos en estudio siguen una dinámica estrictamente determinista. Por ello se coincide con Ellner, Nychka y Gallart (1992), quienes proponen utilizar un enfoque híbrido, compuesto por un componente no lineal que describe la dinámica endógena del sistema y un término estocástico que de cuenta de las perturbaciones exógenas.

En síntesis, el modelo desarrollado combina ciertas características de la dinámica compleja con un proceso de forzamiento estocástico "tenue", en el sentido que la reacción no es solamente explicada por la perturbación sino sobre todo por la dinámica endógena del sistema. Se entiende que esto es una mejor representación de

la realidad de los sistemas económicos, si la alternativa es aplicar un enfoque totalmente determinista o totalmente estocástico.

Por otro lado, se pone de manifiesto la "simpleza del modelo". Nótese que se ha logrado emular en forma bastante contundente un comportamiento empírico en base a tres componentes muy simples: dos reglas de comportamiento y una variable aleatoria con distribución normal.

Vale destacar que no ha sido necesario apelar a hipótesis *ad hoc* para darle una "mejor" forma al modelo. En todo caso, el desafío principal radica en analizar la robustez o consistencia empírica en los valores de los parámetros de control.

4.2. CASO II: Las economías latinoamericanas

En este apartado se presenta el segundo caso de estudio de este trabajo, vinculado al impacto de la crisis financiera internacional al conjunto del bloque denominado "América Latina y el Caribe".

En primera instancia se hará una breve referencia al contexto mundial, para pasar directamente a analizar el estado de las economías latinoamericanas al momento del estallido de la crisis *subprime*, los canales de propagación de la misma y el nivel de impacto sobre la macroeconomía del bloque. Más adelante se abordará particularmente el caso Argentino, dado que ostentó dinámicas bastante particulares dentro del escenario estudiado.

El objetivo final es evaluar la aplicación de la dinámica compleja como meta-modelo para analizar economías que ostentan vulnerabilidades estructurales y tendencia a la amplificación de *shocks*.

A continuación se presenta una síntesis del panorama internacional que se observaba con relación a la incidencia de la crisis financiera global en la economía de distintos países.

4.2.1. Panorama Internacional

De acuerdo al Banco Mundial¹⁹, lo que inicialmente fue una crisis financiera se convirtió en una crisis económica mundial, con las siguientes características:

- Se registraron caídas en las exportaciones y cuantiosos retiros de capital en los países en desarrollo.
- Se registró una disminución del comercio mundial en 2009 por primera vez desde 1982.
- Se redujo la inversión extranjera y el crédito a corto plazo.

En términos de afectación de las economías, de acuerdo a estimaciones del Banco Mundial, aproximadamente un 40% de un total de 107 países en desarrollo está muy expuesto a los efectos de la crisis, mientras que el resto está relativamente expuesto y menos del 10% se enfrenta a un riesgo leve.

L

¹⁹ Sitio web oficial del Banco Mundial - Información del 26/03/2009 - <http://www.bancomundial.org/temas/crisisfinanciera/>

Es por ello que la crisis fue y está siendo atendida por todos los países y bloques regionales, principalmente mediante la implementación de planes de incentivos y reactivación ("salvatajes"). Según Ter-Minassian²⁰, en general, la política monetaria ha sido la primera línea de defensa contra la crisis:

- La respuesta de los bancos centrales ha sido proveer liquidez al sistema financiero.
- Durante cierto período de tiempo el foco fue puesto en la baja de los tipos de interés de referencia, dado que las tasas de mercado continuaban elevadas, reflejando posibles riesgos de pago y temor a futuras restricciones de liquidez.
- Los bancos centrales aplicaron intervenciones directas a los mercados de créditos. Por ejemplo, el balance de la Reserva Federal de EE.UU. creció u\$s 1.300 billones (9% del PIB) en 6 meses.

No obstante, se observó que las acciones de las Autoridades Monetarias no fueron suficientes para reactivar las economías, motivo por el cual los gobiernos han apoyado al sector financiero con recursos del tesoro, con su consecuente costo fiscal. Las principales políticas aplicadas fueron las siguientes:

- Inyecciones de capital
- Compra de activos
- Empréstitos directos

En este sentido, muchos países han aplicado planes de reactivación económica vía estímulos fiscales, pero vinculados a la actividad real (obra pública, subsidios, etc.).

4.2.2. La Situación de América Latina

En el caso de los países de América Latina, la crisis financiera internacional se ha propagado a través del sector real. Paradójicamente, y a diferencia del pasado, los mercados emergentes han permanecido relativamente estables, principalmente por el hecho de presentar una macroeconomía más consistente, *fundamentals* más sólidos que en el pasado, sostenidos niveles de crecimiento real y una mayor solvencia financiera. Por ello, ante el estallido de la crisis *sub-prime*, los emergentes no sufrieron el habitual impacto financiero (como por ejemplo el sufrido durante el tequila, crisis rusa, coreana, etc.). Por el contrario, el impacto fue dado por los efectos reales de la desaceleración del crecimiento mundial, lo cual generó una caída en la demanda de productos por parte de los mercados mundiales. Consecuentemente, ello

L

²⁰ Fuente: Ter-Minassian, Teresa - Exposición al Banco Fator, San Pablo, Brasil, 10 de marzo de 2009.

puso en peligro no solamente las cuentas externas sino que además generó incertidumbre respecto a la consistencia macro-fiscal.

En síntesis, si bien en un principio se observó una cuasi dinámica de “desacoplamiento” de los países emergentes con respecto a los efectos de la crisis internacional, la misma no se ha cumplido, impactando a través de los siguientes canales de transmisión:

- La caída de la demanda interna de los países centrales impacta directamente sobre las exportaciones de los emergentes
- El colapso de los precios de los *commodities* afecta a los países exportadores
- Restricción de acceso al crédito y aumento del costo del financiamiento

A continuación el estudio se explorará el caso de América Latina, detallando el contexto pre-crisis y luego el impacto en las economías de la región. Se sacarán conclusiones importantes en vista a la diversidad de los impactos, siendo peculiar el caso de Argentina.

4.2.2.1. Las condiciones iniciales del bloque latinoamericano

Para América Latina, el período comprendido entre 2003 y 2008 fue un “sexenio de oro²¹”, caracterizado por el crecimiento económico y la bonanza fiscal, principalmente dado por el auge de los precios de los *commodities* y el vigoroso crecimiento del mundo desarrollado y del bloque de los NIC’s, en un marco de alto dinamismo del comercio internacional. Ello permitió que la mayoría de los países latinoamericanos pudiesen emprender procesos de desendeudamiento (con la consecuente caída en los niveles de la deuda pública) y acumular reservas (dado cierta permanencia de superávit comercial). La bonanza económica general se tradujo en una mejora de los indicadores del mercado laboral, y caída de la pobreza y la indigencia en 10 y 7 puntos porcentuales, respectivamente, entre 2002 y 2008. En tanto, la expansión económica fue acompañada por un aumento del gasto público, especialmente en seguridad y asistencia social.

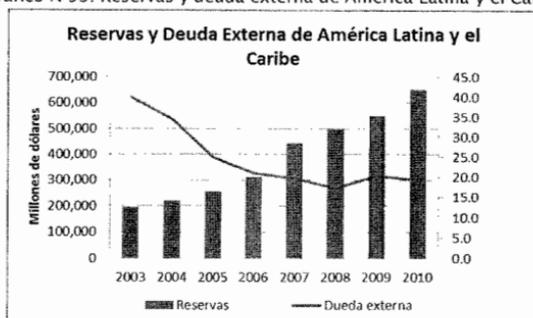
En el gráfico siguiente se resume la evolución de la deuda externa (en porcentaje del PIB) y de las reservas internacionales (en millones de dólares) del bloque latinoamericano. Las reservas se incrementan sistemáticamente, pasando de u\$s

L

²¹ Barcena, Alicia - Políticas Públicas en Tiempos de Crisis - CEPAL - Montevideo, Mayo 2009.

195,400 millones en 2003 a u\$s 547,800 en 2010, mientras que la deuda baja su participación en el PIB del 36.9 en 2003 al 19.3 en 2010.

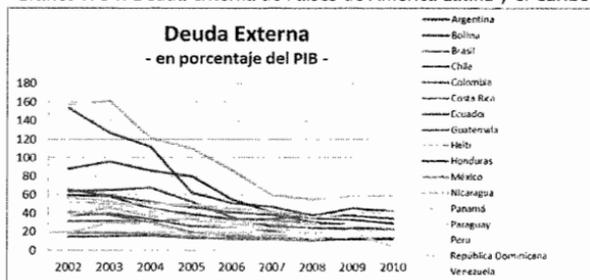
Gráfico N°53: Reservas y deuda externa de América Latina y el Caribe



Fuente: Elaboración propia en base a datos de CEPAL y FMI

Vale destacar que el comportamiento es similar si se observa la información desagregada por país. En el gráfico siguiente se observa que la disminución de la deuda fue generalizada en la mayoría de las economías que componen el bloque.

Gráfico N°54: Deuda externa de Países de América Latina y el Caribe



Fuente: Elaboración propia en base a datos de CEPAL

Respecto a otras condiciones estructurales²², América Latina partió de las siguientes "condiciones iniciales":

- Sistemas financieros saludables

²² Para más información acerca de las menores vulnerabilidades de A. Latina previo a la crisis véase Fernández-Áreas, Montiel (2009).

- Bancos centrales más creíbles
- Regímenes cambiarios más flexibles
- Baja dolarización del crédito

En este sentido, el bloque ostentaba al inicio de la crisis una sólida situación financiera y de consistencia macroeconómica, como asimismo ciertas características estructurales más flexibles o creíbles que en el pasado, lo que permitió que resistiera con mayores herramientas los efectos iniciales de la coyuntura. Según Ocampo (2009), *"lo peculiar del mundo en desarrollo fue su relativa capacidad de aislarse de la primera fase de la crisis, gracias a la renovada bonanza de precios de los productos básicos, la relativa seguridad que representaba para los capitales externos el altísimo nivel de las reservas internacionales y el dinamismo persistente de las grandes economías asiáticas"*.

4.2.2.2. Los Canales De Impacto De La Crisis

4.2.2.2.1. Canal Real

Hay coincidencia en que el primer canal por el cual impactó la crisis internacional en AL fue el canal real. Esto significa que el *shock* sobre el comercio fue más fuerte que sobre el sector financiero, a diferencia de lo registrado en la mayoría de las crisis pasadas. Los efectos en el canal real pueden resumirse en los siguientes puntos:

- Desaceleración de las exportaciones
- Caída de remesas
- Caída de ingresos por turismo y otros vinculados al sector externo.

En órdenes de magnitud, de los tres casos mencionados, el principal ha sido la fuerte caída en las exportaciones, siendo entonces el *shock* comercial el impacto más grave en la región. No obstante, las economías han sido afectadas en forma diferente de acuerdo a su grado de apertura: *"las economías que más se jugaron por el libre comercio son las más afectadas"*²³.

L

²³ Barcena, Alicia - Políticas Públicas en Tiempos de Crisis - CEPAL - Montevideo, Mayo 2009.

Gráfico N°55: Variación interanual de las exportaciones de países de América Latina y el Caribe

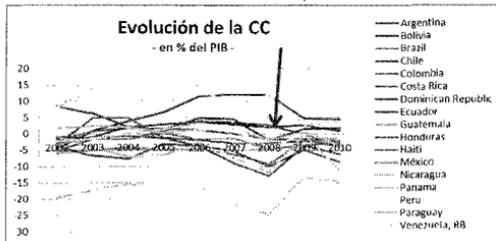


Fuente: Elaboración propia en base a datos de CEPAL

En este sentido, Chile es uno de los países más afectados del bloque dada su alta dependencia externa. En el caso de Ecuador y El Salvador, han sido afectados por el hecho de estar dolarizados. En Brasil y México, se observa una caída muy fuerte del sector manufacturero, dados los problemas de adaptación de dicho sector por revestir una estructura poco flexible.

En el gráfico siguiente se presenta la evolución de la cuenta corriente del balance de pagos, medida en porcentaje del PIB. Nótese como la misma se ve resentida en casi todos los países del bloque durante 2008. Incluso, en la mayoría de los casos se revierte el signo de la misma, pasando de ser superavitaria a ser deficitaria en dicho año.

Gráfico N°56: Evolución de la cuenta corriente de países de América Latina y el Caribe



Fuente: Elaboración propia en base a datos de CEPAL

En tanto, el gráfico siguiente se presenta la evolución del resultado fiscal. En este caso, se observa que casi todas las economías del bloque sufrieron un fuerte

empeoramiento del mismo durante 2009, en muchos casos también revirtiendo su signo (es decir, pasando a ser deficitario).

Gráfico N°57: Evolución del resultado fiscal de países de América Latina y el Caribe



Fuente: Elaboración propia en base a datos de CEPAL

En este sentido, una particularidad del *shock* comercial en el caso de América Latina es su impacto sobre los ingresos tributarios. Esto es, los ingresos públicos de la mayoría de los países de América Latina están correlacionados con los precios de los productos de exportación, siendo dicha relación muy marcada en el período comprendido entre 2002 y 2008. En el caso de Argentina esta relación es muy marcada, dada la incidencia de los impuestos sobre la exportación.

Si bien se ha observado que la mayoría de los países mejoraron su recaudación aumentando la presión tributaria, la región todavía recauda muy poco con relación a su nivel de desarrollo y, además, la recaudación está muy concentrada en impuestos indirectos. Respecto a los efectos de la crisis que impactaron en una caída de los ingresos tributarios, pueden mencionarse los siguientes:

- Caída del nivel de actividad
- Caída de precios de productos primarios
- Importancia de los recursos naturales
- Grado de apertura de la economía

La estrecha vinculación de la estructura tributaria con los *commodities*, la concentración en impuestos indirectos y su alta sensibilidad frente al ciclo económico generó que los recursos tributarios se vean particularmente resentidos en el contexto de recesión mundial.

En este sentido, como fue dicho, los países pequeños y muy abiertos han demostrado ser los más vulnerables: en un extremo están Ecuador y Panamá; en el otro extremo (menos vulnerables) se ubican Argentina y Brasil. Se destaca el caso de Argentina,

donde se registró la menor caída de la recaudación en términos reales durante el primer trimestre de 2009.

En el gráfico siguiente puede observarse el "coeficiente de exposición de la recaudación tributaria ante la crisis internacional", siendo superior en todos los casos de América Latina respecto al promedio de la OCDE.

Gráfico N°58: Coeficiente de exposición de la recaudación tributaria ante la crisis internacional



Fuente: Jimenez y Gomez Sabaini (2009)

Nótese que, como fue dicho, países pequeños y abiertos encabezan el *ranking*, mientras que Argentina y Brasil han resultado ser los menos sensibles, pero con nivel de exposición en torno del doble del promedio de la OCDE.

4.2.2.2.2. Canal Financiero

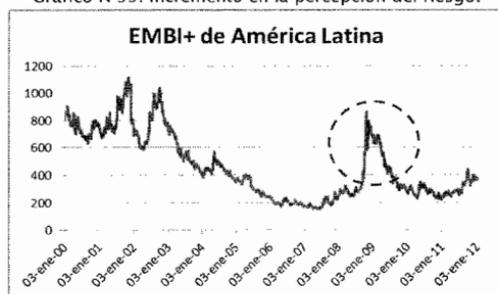
Si bien como fue dicho el primer impacto de la crisis fue a través del sector real, principalmente mediante un *shock* comercial, la región no fue ajena a los efectos financieros.

Vale destacar que en el epicentro de la crisis la liquidez del sistema monetario internacional se encontraba comprometida. El efecto "desapalancamiento" del sector

privado generó la profundización de la crisis y tuvo y tendrá efectos en el crédito tanto en economías desarrolladas como subdesarrolladas. Esto tiene un impacto directo sobre el "espacio fiscal", dado que el mismo estará acotado en disponibilidad de recursos financieros, en el contexto actual pero también en el futuro.

En el caso de América Latina, esta situación se vio profundizada por la salida de capitales desde los mercados emergentes hacia los desarrollados a modo de resguardo frente al riesgo (*flight to quality*). Respecto a ello, a pesar de los esfuerzos de América Latina para mejorar la situación macro en el periodo de bonanza, durante la crisis se generó un incremento en la percepción del riesgo sobre estas, traducido en un proceso de fuga de capitales. No obstante, de acuerdo a Jiménez y Fanelli (2009), este proceso fue menos radical que en crisis pasadas.

Gráfico N°59: Incremento en la percepción del riesgo.



Fuente: Elaboración propia en base a datos de Bloomberg

Respecto a esto Jimenez y Fanelli (2009) destacan que la "*menor reacción del premio de riesgo es consistente con el hecho de que América Latina mostraba un cuadro más sólido en sus fundamentos macroeconómicos en comparación con otras circunstancias de turbulencia internacional*".

En síntesis, el impacto financiero se canalizó de la siguiente forma:

- En términos generales, a través de la restricción del crédito a nivel internacional, en un momento de incremento de las necesidades de financiamiento. No obstante, la restricción crediticia no es un fenómeno particular de América Latina, sino que afecta a todas las economías del planeta. La cuestión radica en que las necesidades de financiamiento relativas de bloque son mayores, dado el efecto de la mayor sensibilidad a la baja de los recursos tributarios, en momentos en los cuales es necesario aplicar políticas anticíclicas.

- En términos particulares, a través del proceso de fuga de capitales generado por el aumento de la percepción del riesgo sobre el bloque, lo cual profundiza el proceso de “*flight to quality*” antes mencionado.

Respecto a esto, Korinek (2008) sostiene que cuando los inversores internacionales profundizan su aversión al riesgo, pueden generar crisis en los emergentes inducidas por contagio incluso ante la ausencia de *shocks* adversos domésticos. El *sudden stop* generado por la fuga de capitales (venta de activos o no continuación de los *roll over*) genera presiones sobre el tipo de cambio y puede inducir a mecanismos de propagación financiera que terminen en una crisis. Este fue el caso de muchos emergentes en el contexto de la crisis *subprime* (Korinek, 2008).

En tanto, en el caso que la tenencia de activos este denominado en moneda extranjera, en los emergentes incrementa el riesgo de las crisis financiera y magnifica la volatilidad macroeconómica (Calvo *et al.*, 2004 y Levy Yeyaty, 2006).

4.2.2.3. Implementación de Políticas en Tiempos de Crisis

En vista del contexto antes descrito, en esta sección se mencionarán algunos puntos clave respecto a la aplicación de políticas anticíclicas que permita mitigar o al menos amortiguar los efectos de la crisis sobre la economía en su conjunto. Se resumirán cuestiones relacionadas con la dinámica procíclica de recursos y gastos, con la conveniencia de aplicar aumento de erogaciones o baja de impuestos y con el horizonte de aplicación de políticas activas.

4.2.2.3.1. Política Fiscal y Tributaria

Al momento de diseñar un plan de reactivación económica, surge la disyuntiva entre incrementar el gasto público o reducir impuestos. Respecto a la aplicación de tales estrategias, puede resumirse lo siguiente:

- Incrementar el gasto es más difícil operativamente y lleva más tiempo, pero tiene un mayor impacto en la economía (multiplicador más elevado). Las dificultades operativas están vinculadas tanto con el nivel de eficiencia de las burocracias estatales para aplicar los programas, como también con la necesidad, en muchos casos, de que los mismos sean aprobados por el Poder Legislativo.

- Bajar impuestos es más fácil, en muchos casos alcanza con una decisión administrativa, pero su impacto en el nivel de actividad es menor. Incluso, dependiendo del perfil de la estructura impositiva, bajar impuestos carece de sentido, dado que la mayor parte de la tributación proviene de los sectores de altos ingresos, por lo cual difícilmente una baja impositiva tenga efectos expansivos.

De acuerdo con lo anterior, la balanza se inclinaría hacia la aplicación de políticas fiscales activas, especialmente porque mediante las mismas es más factible focalizar en los sectores vulnerables o en aquellos más afectados por la crisis (a diferencia de las rebajas impositivas). No obstante, una condición de partida debe ser el asegurar la sustentabilidad de la expansión de los gastos, temática que se discutirá más adelante.

Por otro lado, al momento de diseñar e implementar un plan fiscal, cabe preguntarse si una política anticíclica es necesariamente estabilizadora. Respecto a esto, la experiencia internacional muestra que no necesariamente, porque la reacción de los agentes varía, por ejemplo, según sean países endeudados o no endeudados. Según De Mello y Moccero (2010), en las economías de la OCDE, cerca del 50% de la reducción del ahorro público se compensa con un aumento del ahorro privado. Esto quiere decir que la efectividad de los paquetes fiscales está relacionada con la magnitud de los multiplicadores: en los países de la OCDE los programas de gastos ostentan multiplicador cercano a 1, mientras que para los programas de reducción de impuestos es de 0,5. Pero la cuestión principal es que los mismos se reducen en contextos de crisis, por la cuestión del endeudamiento, reacciones de los agentes, expectativas sobre la solvencia, etc. En este sentido, es importante tener presente la posibilidad de reversibilidad de la política fiscal, es decir, la existencia empírica de multiplicadores negativos²⁴ en ciertos contextos, como justamente, de crisis.

Como conclusión, se destaca a tener en cuenta:

- Las limitaciones que presentan las políticas anticíclicas
- Los efectos en el endeudamiento (sustentabilidad del programa)
- Los costos fiscales
- El nivel de los "derrames" asociados al valor de los multiplicadores

L

²⁴ Dada la incertidumbre sobre el futuro, los agentes reaccionan ahorrando la totalidad del mayor ingreso disponible generado por la política expansiva; paralelamente realizan provisiones adicionales, dada la desconfianza acerca de la sustentabilidad o financiamiento de la misma, generando al final de cuentas un efecto contractivo al conjunto de la economía.

- La existencia de una gran incertidumbre de los efectos de reducir las alícuotas de los bienes de primera necesidad
- El efecto "overshooting" de medidas, dado que en ciertos casos luego hay que aplicar medidas contraccionistas para evitar el "calentamiento" de la economía o la no sustentabilidad de la política.

4.2.2.3.2. Sesgo Procíclico

En cuanto a la correlación de los recursos y erogaciones respecto a la evolución del ciclo económico, puede resumirse el siguiente diagnóstico para el caso de América Latina:

- La estructura impositiva tiene un elevado grado de sensibilidad al ciclo económico, dada la alta dependencia de impuestos sobre recursos naturales, la baja participación relativa del impuesto a la renta y la incidencia de impuestos "fáciles"²⁵ implementados por parte de los administradores tributarios. Ello genera que ante caídas del nivel de actividad la recaudación se retrotraiga fuertemente.
- Por otro lado los gastos públicos siguen la evolución de los recursos: buena parte de los ingresos ya están "pre - asignados", con lo cual el gasto crece independientemente de lo que haga el gobierno.

Luego, frente a una gran rigidez del gasto y frente a una gran sensibilidad de los ingresos el "espacio fiscal" para implementar políticas activas es reducido.

Pero por otro lado, suponiendo cierto margen de espacio para aplicar políticas activas, cabe preguntarse cuán contracíclica es la política fiscal en América Latina. Respecto a ello, De Mello y Mocerco (2006) muestran que los efectos de los estabilizadores automáticos y de la discrecionalidad son diferentes en América Latina en comparación con los países de la OCDE. Respecto a ello puede resaltarse lo siguiente:

- Los estabilizadores automáticos de América Latina no son tan potentes como en la OCDE. Ello está relacionado con la progresividad de los impuestos indirectos, con el diseño de los seguros de desempleo y con el tipo de contribuciones sociales.
- En este sentido, América Latina es más rígida en capacidad de respuesta en relación a los estabilizadores automáticos, a diferencia de los países OCDE (por ello este grupo de países no necesita tanta discrecionalidad en su diseño de políticas

²⁵ Se refiere al conjunto de impuestos que generalmente de simple aplicación y administración pero que son de tipo distorsivo (por ejemplo, en el caso Argentino, el impuesto al cheque en el ámbito nacional y el impuesto a los ingresos brutos en el ámbito provincial).

anticíclicas). A modo de ejemplo, Dinamarca y Suecia tienen los niveles de respuesta más rápidos (De Mello y Moccerro, 2006).

Con relación a la política tributaria, es necesario tener presente que la estructura tributaria de la región es muy regresiva: el coeficiente de Gini de América Latina es peor después de impuestos que antes de impuestos. A modo de ejemplo, si se mide el IVA en términos de contribución absoluta, el mismo resulta progresivo, en el sentido que en promedio los 2/3 de la recaudación lo aportan los sectores socioeconómicos de mayores recursos. Esto significa que, si bien medido en términos de ingreso personal este impuesto es regresivo, en términos de contribución de cada sector de ingresos no lo es. Esto resulta importante al momento de evaluar la implementación de las políticas tributarias de reactivación, dado que una reducción de alícuotas de este impuesto puede generar un abrupto hueco fiscal sin generar los efectos de reactivación acordes al costo mencionado, en el sentido de que la propensión marginal a consumir de los sectores de altos ingresos es menor que la de sectores medios y bajos (e incluso se reduce en tiempos de crisis), redundando en consecuencia en un menor efecto multiplicador.

4.2.2.3.3. Horizonte

Otra dimensión que debe ser tenida en cuenta al evaluar los efectos de la política fiscal en tiempos de crisis, es si los agentes la observan como realmente anticíclica, en el sentido si se cree que las medidas adoptadas son de carácter transitorio o permanente. En general, para que la medida sea entendida como no permanente, deben establecerse mecanismos estrictos para que esas políticas finalicen cuando se alcance cierto nivel de estabilidad. Dado el incremento en la percepción del riesgo sobre las economías del bloque en aquel contexto de crisis, el mostrar transitoriedad en la implementación de planes anticíclicos puede evitar mayores salidas de capitales a las ya generadas, y por lo tanto favorecer la efectividad de la política. Caso contrario, la política puede tener efectos neutros e incluso adversos.

4.2.2.4. Propagación de *shocks*

Al comienzo de la crisis se registraban en América Latina ciertas condiciones iniciales muy particulares que amortiguaron inicialmente los efectos de la misma, aislando a la región de los impactos financieros "tradicionales" que habitualmente generan las crisis externas. La profundización y prolongación de la problemática en el mundo desarrollado terminó expresándose en la economía real, generando una recesión

mundial y afectando al bloque latinoamericano principalmente por la reducción del comercio internacional, para luego ser afectado por efectos financieros (fuga de capitales, restricción del crédito, etc.). Ahora bien, independientemente de los canales de transmisión y la forma del impacto, no cabe duda de que la crisis internacional configura otro caso de "shock exógeno". En este sentido, *"el hecho de que los momentos de reversión de los flujos coincidan con eventos clave en el avance de la crisis bancaria en los Estados Unidos y Europa y que dicha reversión se haya dado en un contexto no sólo de alto crecimiento sino también de mayor estabilidad macroeconómica en la región, sugiere que el evento es exógeno a América Latina y reviste características típicas de una interrupción súbita inducida por contagio"* (Jiménez y Fanelli, 2009).

Ahora bien, en vistas de las dinámicas descritas, se plantea la factibilidad de analizar el caso de estudio a través de uno de los conceptos planteados en el marco teórico de este trabajo. El punto fundamental radica en que, tradicionalmente, las economías latinoamericanas tenderían a ser "amplificadoras" de los shocks exógenos, dadas ciertas características que generan una alta volatilidad endógena subyacente, la cual emerge ante perturbaciones externas. En este sentido, el *shock* puede empeorar dadas las condiciones iniciales del conjunto de la economía, asociadas a las mencionadas cuestiones estructurales. Es decir, si bien el bloque pareció aislado en momentos iniciales, posteriormente comenzó a propagarse un efecto de amplificación de las perturbaciones iniciales dados los puntos clave desarrollados en el cuerpo del trabajo, como por ejemplo:

- Amplificación del *shock* comercial a través de la sensibilidad de la estructura tributaria respecto al sector externo
- Menor efectividad de la política fiscal:
 - dada la falta de estabilizadores automáticos
 - disminución del efecto multiplicador por desconfianza acerca del de la discrecionalidad, financiamiento y horizonte de los planes implementados (posibilidad de multiplicadores negativos)
- Amplificación del *shock* financiero dado el tradicional proceso *flight to quality*.

Por otro lado, el sesgo procíclico mencionado en el cuerpo del trabajo también contribuye a la amplificación de *shocks*. Siguiendo a Ocampo, *"la historia de América Latina desde los años setenta está marcada no sólo por grandes perturbaciones externas, tanto positivas como negativas, sino también por políticas macroeconómicas que tienden a reforzar en vez de atenuar los efectos de dichas conmociones en la actividad económica interna, esto es, políticas macroeconómicas procíclicas. El problema fundamental de este comportamiento es que durante las fases favorables del*

ciclo económico surgen una serie de vulnerabilidades, básicamente déficits públicos o privados que generan altos niveles de endeudamiento y cuya contrapartida son los déficits en la cuenta corriente de la balanza de pagos, alimentados también por una sobrevaluación de las monedas nacionales. Dichas vulnerabilidades quedan de manifiesto cuando se terminan las condiciones externas excepcionales y hay que realizar severos ajustes macroeconómicos, sea de carácter fiscal (en que se combinan diversos grados de recorte del gasto y aumento de los impuestos), políticas monetarias y crediticias restrictivas y fuertes ajustes del tipo de cambio” (Ocampo, 2009).

Por su parte, Jiménez y Fanelli resaltan que *“las fuerzas recesivas se potencian debido a que la caída de las exportaciones reduce directamente la demanda agregada mientras que la restricción financiera y de la IED la reducen de manera indirecta al afectar la demanda de inversión y de bienes durables de consumo y limitar la capacidad de respuesta anticíclica de los gobiernos. Se plantea que las perturbaciones inducidas por la crisis internacional se están expresando, sobre todo, como choques comerciales exógenos e interrupciones súbitas (sudden stops) de los flujos de capital. Además, se argumenta que la forma e intensidad de las perturbaciones que se observan en cada economía de la región dependen de factores estructurales como el tamaño de la economía, la cuantía de los flujos y el tipo de especialización en el comercio” (Jiménez y Fanelli, 2009).*

Adicionalmente a los ajustes fiscales, monetarios y cambiarios tradicionalmente aplicados (cuya principal consecuencia son drásticas transferencias de ingresos), existen otros fundamentos estructurales que coadyuvan a incrementar la volatilidad endógena, principalmente aquellos ligados a las expectativas, la confianza y la memoria de largo plazo (*“path-dependence”*). Asimismo, al no tener ciertas cuestiones estructurales resueltas (como por ejemplo el sistema de seguridad social), posiblemente las economías latinoamericanas seguirán siendo amplificadoras de *shocks*, sobre todo teniendo en cuenta el hecho de que estas economías transitan por senderos dinámicos inestables. En este sentido, parecería que conceptualmente no existiría *“política anticíclica”* en tiempos de crisis en América Latina: *“en América Latina la interpretación de estabilizar en el sentido de suavizar el ciclo sólo se utiliza en tiempos normales, cuando la economía se mueve dentro del corredor. Cuando ocurre una perturbación suficientemente grande o los mecanismos de propagación del choque desestabilizan en forma automática la economía amenazando con ponerla en un sendero explosivo, la interpretación de los tiempos normales se deja de lado con naturalidad” (Jiménez y Fanelli, 2009).*

En síntesis, dadas las particularidades de las economías que generan el efecto propagación de *shocks* exógenos y la dificultad estructural de aplicar políticas anticíclicas propiamente dichas, los países del bloque terminan aplicando, en palabras de Fanelli (2008) políticas "anti-crisis". Esta mecánica, lejos de salvaguardar la estabilidad económica, intenta evitar un colapso sistémico, terminando en muchos casos en fuertes ajustes fiscales, monetarios y/o cambiarios. Y es en este sentido que el impacto más destructivo de la crisis se da en la cohesión social: las políticas aplicadas amortiguan pero no evitan la problemática; como consecuencia los niveles de pobreza se ven incrementados. A esto hay que sumarle el denominado problema de "histéresis" en América Latina, esto es, la persistencia de la pobreza y el desempleo dada la imposibilidad de ciertos sectores marginales de reincorporarse al mercado aún en contextos de bonanza: *"en América Latina son frecuentes las perturbaciones que tienen efectos permanentes y no sólo temporales sobre la economía. Las perturbaciones que inducen mutaciones permanentes se relacionan con episodios de crisis, cambios en la estructura económica (choques externos, institucionales) y perturbaciones aleatorias que influyen en la tendencia de largo plazo"* (Jiménez y Fanelli, 2009).

Esto imprime grandes implicancias en el análisis de riesgo, dado que, de acuerdo a lo anterior, en este tipo de economías el riesgo macroeconómico fagocita al riesgo microeconómico. Ello implica que no resulta eficiente aplicar la tradicional segmentación del riesgo de acuerdo a la secuencia riesgo internacional, riesgo soberano, riesgo sector y riesgo comercial, generando problemas de *sub* o *sobre* estimación.

Esto significa que no es posible desligar el riesgo de un sector o activo del análisis macro-fiscal. Para citar un caso, los sistemas bancarios de países en desarrollo tradicionalmente se encuentran bajo la presión de déficits estatales (Honohan, 1997), dada la demanda de recursos financieros por parte del sector público hacia las entidades financieras. Esto lleva a una mayor exposición frente al sector público, lo cual puede generar un deterioro de la solvencia y poner en jaque la capitalización y la liquidez de las instituciones. Las crisis de Asia de 1997/98 y Argentina del 2001 son claro ejemplos del caso. Por ello, el estado actual y la sustentabilidad del balance del sector público es una variable que debe ser tenida en cuenta en muchos países en desarrollo al momento de diagnosticar el riesgo (Mermenstein, 2010). En este caso, el riesgo sector ("riesgo banco").

4.2.3. El modelo analítico

Ahora bien, ¿cuál es el conjunto de modelos que incorporan la persistencia y/o amplificación de *shocks*?

Una respuesta al interrogante son los modelos complejos y la dinámica caótica. En este sentido, vale recordar, brevemente, cuál son las visiones analíticas tradicionales para contraponerla a la propuesta mencionada.

La visión tradicional adscribe que el sistema económico se encuentra en equilibrio, y que las fluctuaciones observadas en el mismo son efecto de perturbaciones exógenas, las cuales tienen efectos solamente en el corto plazo. Es decir, la estructura interna del sistema "absorbe" (más rápido o más despacio) los efectos del *shock*.

Este concepto se aplica no solamente a los *shocks* "inesperados" (una crisis, un incremento de precios de *commodities*, etc) sino también de los de política (por ejemplo, fiscal y/o monetaria). En este sentido, el modelo tradicional (de *shock* transitorio) valida la hipótesis de neutralidad de largo plazo de las políticas cuantitativas activas.

A continuación se grafica esta idea con un ejemplo muy simple, haciendo uso de un modelo que tiende a un sendero de equilibrio. Luego se lo contrapondrá al caso opuesto, es decir, un modelo en desequilibrio (incluso caótico).

El gráfico siguiente corresponde a la trayectoria de un modelo que se encuentra en equilibrio (*steady state*).

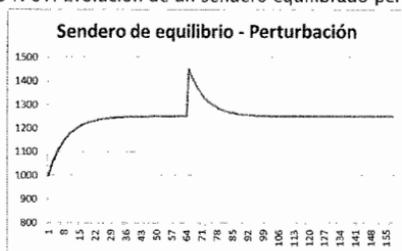
Gráfico N°60: Evolución de un sendero equilibrado



Fuente: Elaboración propia

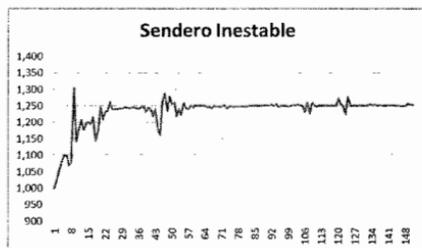
Si se perturba el modelo, el mismo regresa, luego de un tiempo, al equilibrio original. Esta es, justamente, la visión analítica de la corriente tradicional.

Gráfico N°61: Evolución de un sendero equilibrado perturbado



Fuente: Elaboración propia

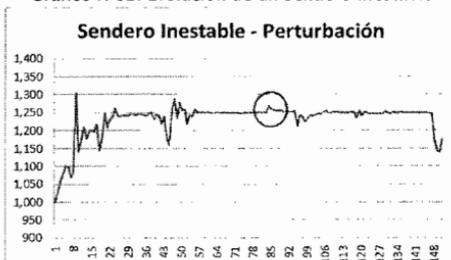
Ahora bien, a continuación se realiza el mismo ejercicio, pero bajo un modelo bajo un sendero inestable (en este caso se apela al uso de un sendero caótico).



Fuente: Elaboración propia

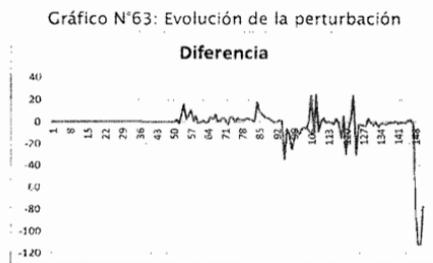
Si se perturba el modelo, el mismo no regresa a su trayectoria original.

Gráfico N°62: Evolución de un sendero inestable



Fuente: Elaboración propia

Esto se observa mejor al graficar la diferencia entre ambas series.



Fuente: Elaboración propia

Nótese incluso que la magnitud del *shock* tiende a incrementarse a medida que pasa el tiempo. Es decir, en primer lugar la perturbación es pequeña, permanece durante cierto tiempo y luego se incrementa erráticamente, para finalmente generar un colapso (caída abrupta).

4.2.3.1. Selección del modelo

Ahora resta vincular los hechos estilizados con la visión analítica del modelo. Es decir, si para analizar el riesgo de una economía (en el sentido del nivel de perturbabilidad frente a *shocks*) o la efectividad de las políticas cuantitativas, se optará por la visión del equilibrio o del desequilibrio. En este sentido, el punto clave se encuentra en el diagnóstico. Y de acuerdo al estudio exploratorio del caso latinoamericano, se adscribe a que un modelo más apropiado para evaluar la performance de las economías de la región en tiempos de crisis esta dados por aquellos que incorporan por lo menos alguna de las siguientes:

1. La reversibilidad
2. La persistencia del *shock*
3. La amplificación del *shock*

Como fue desarrollado, se concluye que un modelo que incorpora las tres características es la dinámica caótica.

4.2.3.2. Alcances y limitaciones de la visión analítica propuesta

En primer lugar debe quedar en claro que la propuesta de modelo analítico se restringe a la generalidad del caso de Latinoamérica, en principio, para el período temporal analizado. En general, las dinámicas amplificadoras de *shocks*, se registran en una estructura que es sistemáticamente vulnerable y que se expresa en períodos de crisis.

Por ello, el modelo propuesto dista de ser general, en el sentido que, por ejemplo, las economías desarrolladas bajo períodos de relativa estabilidad, ostentan dinámicas más asemejables al modelo de equilibrio. En este sentido, sigue el interrogante siguiente: ¿Pueden ser las economías desarrolladas amortiguadoras de *shocks*? La respuesta es, en principio, afirmativa. Esto se fundamenta en que en tales economías se registran características estructurales contrarias a las que fueron calificadas como vulnerabilidades del bloque latinoamericano. En primer lugar, la estructura productiva de esas economías se encuentra ampliamente diversificada, abarcando en forma vertical y transversal todos los sectores económicos (nótese que las economías centrales son grandes productores de tecnología y al mismo tiempo fuertes productoras de materias primas)²⁶. Esto asimismo genera que la estructura tributaria se encuentre asimismo diversificada.

El segundo factor a tener en cuenta, es que el efecto *flight to quality* es inverso en el bloque desarrollado. Es decir, por definición, tales economías son las receptoras de ese movimiento de capitales. Este se verifico incluso en el contexto de la crisis *subprime*, donde la economía americana, que fue el epicentro de la crisis, fue receptora de capitales²⁷. Es decir, aún en sus propias crisis el efecto le ha jugado a favor.

El tercer factor es la existencia de estabilizadores automáticos relativamente eficientes, como asimismo la existencia histórica de fondos de reserva que permiten la aplicación de políticas anticíclicas. En este sentido, si se acepta la existencia de sendero de equilibrio, se acepta el concepto de política anticíclica.

Por último, un tema transcendental, que si bien no fue tratado como eje en este trabajo no debe omitirse, es la mayor fortaleza institucional de tales economías, lo cual se traduce en una mayor credibilidad por parte de los agentes y por lo tanto en menores comportamientos defensivos²⁸.

L

²⁶ En contraste, las economías emergentes generalmente han apuntalado su patrón de crecimiento en alguna rama o sector particular; cualquier afectación a ese sector se derrama al conjunto de la economía.

²⁷ Este efecto fue tan marcado que incluso durante un puñado de días los títulos del tesoro americano eran demandados amén de tener un rendimiento negativo (entiéndase efecto "caja de seguridad").

²⁸ Corridas bancarias, fugas de capitales, ahorro preventivo, dilatación de decisiones de inversión, no cumplimiento de contratos, etc.

En síntesis, si bien el modelo propuesto fue fundamentado en el marco del caso de estudio desarrollado, queda como interrogante de si su aplicación puede extenderse a otros mercados emergentes o a otros contextos de crisis.

En cuanto a las limitaciones de la visión analítica propuesta, vale preguntarse por qué no ha sido exitosa la modelización en base a la dinámica caótica.

En primer lugar, a lo largo de la bibliografía se acepta que el caos (i) es fruto de un sistema de ecuaciones deterministas y (ii) que es generado por un puñado de ecuaciones (no lineales). En base a esto, a lo largo de la literatura se fundamenta la no adopción del enfoque en base a que la inherente complejidad del sistema económico no sería loable de ser descripta por un número reducido de ecuaciones determinísticas no lineales. En la mayoría de los casos este motivo se expone como razón suficiente para adoptar un enfoque puramente estocástico.

Por otro lado, Schuchny (2001) plantea que *"en rigor de verdad hablar de caos (determinístico) no tiene sentido si no se conoce el sistema dinámico en cuestión. Sólo porque sabemos que existe uno, con ecuaciones bien especificadas, y porque podemos variar sus parámetros, es que tiene sentido hablar del caos"*.

En primer lugar, no se comparte la clasificación del caos como un simple sistema determinista. Como ya fue mencionado, la concepción de la dinámica caótica como sistema determinista es campo de arduas discusiones (véase Lombardi (2001), Mindlin (2008) y Muñoz (2011)). Además, tampoco implica que no pueda ser adoptado un enfoque mixto (Elner *et al*, 1992).

En segundo lugar, tampoco se comparte que la totalidad del sistema va a estar explicada solamente por un número reducido de ecuaciones.

Respecto a la necesidad de disponer de un set de ecuaciones para "hablar de caos", no es el enfoque dado en esta sección de trabajo donde, como fue advertido el enfoque es mayormente cualitativo.

Es decir, se propone en primera instancia un cambio de visión acerca de la concepción del sistema económico, planteando el uso de la dinámica caótica como modelo analítico pero no como modelo instrumental.

No obstante, debe quedar claro que el concepto introducido es el de amplificación de *shocks*. Ahora bien, ¿esto implica en forma directa el uso de la dinámica caótica? La respuesta es que no necesariamente, cualquier modelo que sobre-reaccione a los efectos de un *shock* exógeno, con efectos en el largo plazo, y que además se encuentre acotado, podría ser asimismo utilizado.

No obstante, como fue planteado, la dinámica caótica cumpliría con la representación de los hechos estilizados planteados en contextos de crisis. Lo que si es seguro es que para el caso de estudio desarrollado no hay que apelar al uso del *"shock"*

imperceptible". Es decir, un modelo caótico va todavía más allá, en cuanto no solamente es amplificador de *shocks*, sino que además es amplificador de *shocks* prácticamente imperceptibles. Por el momento no se hará uso de esa faceta del modelo (no es necesaria para contrastar la hipótesis planteada).

La simulación planteada en el apartado anterior es un modelo de agentes heterogéneos con componentes estocásticas que incluso puede ser convergente a un *steady state*, pero, de ser perturbado, cambia drásticamente su trayectoria. Ahora bien, ¿es esta condición suficiente para catalogar al modelo como caótico? Si bien la respuesta es negativa, no cambia el eje de la cuestión, dado que el planteo es el uso de modelos que ostenten amplificación de *shock* o dinámica emergente pero que no sean modelos divergentes²⁹.

Respecto a esto último, surge el interrogante de por qué no usar un modelo divergente (si lo que se busca es una dinámica amplificadora). La respuesta es bastante simple, y se fundamenta en que la historia muestra que los sistemas económicos no desaparecen en el largo plazo, si bien las crisis se expresan en forma explosiva luego el sistema económico alcanza otro estadio (otro pseudo-equilibrio) en otra configuración del sistema ("otra economía"), es decir, bajo otras reglas de juego. En sentido son necesario modelos que pongan cierto límite a la divergencia, siendo la dinámica compleja (Day, 1994; Chian, 2007) el conjunto de modelos que cumplen con ese requisito. El cambio de las reglas de juego se refleja en el modelo en un cambio paramétrico que permita la transición del "caos al orden". Esto es lo que la literatura habitualmente acuña como un caso de auto-organización.

Vale destacar que, como fue desarrollado en el marco teórico, aceptar como visión analítica un modelo que incorpore las características descriptas, implica levantar el supuesto de expectativas racionales. De acuerdo a Heymann (2007), "*con expectativas racionales no se concibe que las leyes de movimiento del sistema experimenten cambios paramétricos. Nociones como cambio de régimen, "variaciones de reglas de juego" y similares están, en rigor, contrapuestas con el conocimiento que se les asigna a los agentes con expectativas racionales, y que es incompatible con cambios en el modelo de comportamiento que describe al entorno*".

De acuerdo a esto, el modelo tradicional no da espacio para la ocurrencia de crisis. En tanto, la visión alternativa propuesta constituye, justamente, un modelo de crisis. Si

L

²⁹ No obstante, al desarrollar los testeos pertinentes a la simulación planteada (cálculo del exponente de *Lyapunov*) resulta que el sistema ostenta dinámica caótica.

bien los hechos estilizados descriptos, los cambios en las reglas de juego, etc. son aspectos conocidos y aceptados, por qué no utilizar un modelo matemático que puede emular los mismos.

Por último, si se quiere pasar de la visión analítica a la instrumentación (y disponer de las ecuaciones para "verdaderamente" hablar de caos) un camino es el planteo de un ABM al caso estudiado, quedando este campo abierto a futuras líneas de investigación.

Para culminar esta sección del trabajo, a continuación se profundiza brevemente en el cambio de estructura económica que sufrió la economía argentina, a los fines de mostrar un caso de análisis de diagnóstico de amplificación o amortiguación de *shocks*.

4.2.4. El Caso de la Economía Argentina

El desempeño de la economía argentina de los últimos 20 años puede claramente dividirse en dos períodos bien marcados:

- La década del 90, signada por reformas estructurales
- El período iniciado en la post-crisis del 2002, que continúa hasta nuestros días

Ambos períodos comparten generalidades del bloque latinoamericano, pero por supuesto que también presentan especificidades locales. Básicamente se intentará transmitir la premisa que para realizar un diagnóstico del riesgo (por ejemplo para estimar la tasa de descuento para llevar adelante una inversión real o financiera) es particularmente necesario adscribir a una visión sistémica-emergente. Es decir, se mostrará que los indicadores tradicionales no generan buenas estimaciones en el caso estudiado (pueden subestimar o sobre-estimar el riesgo).

A continuación se realiza una breve descripción de las características fundamentales de la macroeconomía de cada período.

La década de los `90 estuvo caracterizada por los siguientes cambios estructurales:

- Régimen cambiario fijo estilo caja de conversión. Oferta monetaria ligada a movimiento de divisas.
- Privatización de casi la totalidad de los servicios públicos.
- Privatización del sistema previsional
- Apertura del comercio exterior
- Libertad a la movilidad de capitales

- Traspaso de la educación y la salud al sector sub-nacional. Generación de series desbalances verticales, amén de los horizontales previamente existentes.
- Mantenimiento de reservas a través de endeudamiento
- Incremento de la deuda externa

Desde la perspectiva del análisis de vulnerabilidad:

- La caja de conversión genera un impacto automático en la economía: la salida de capitales no tiene un efecto financiero sino también real: reduce la oferta monetaria.
- La fijación inicial de la paridad del tipo de cambio, combinada con un período de estabilidad de precios y luego deflación, generó un importante retraso cambiario.
- La privatización de servicios públicos no tuvo ninguna componente estratégica: los ingresos por la venta fueron aplicados a pagar deuda.
- Una vez privatizados, el Estado dejó de tener injerencia en los hechos en la fijación de tarifas. Por lo tanto, se resignó una herramienta para aplicar políticas activas en tiempos de crisis.
- Se privatizó el sistema previsional. Esto fue la primer causa de la generación del déficit fiscal. Se resignó una herramienta de financiamiento que había sido utilizada desde los años '60.
- El desbalance del sector sub-nacional generó presiones adicionales sobre las necesidades de financiamiento y la tensión social.
- La apertura indiscriminada de las importaciones, combinada con el atraso cambiario, se tradujo en la quiebra de empresas de producción local y de las economías regionales, con el consecuente impacto en el desempleo.

Muchos de los factores mencionados son los que generaron que la economía argentina tuviese un alto efecto contagio de la crisis externas, como por ejemplo el tequila, la crisis rusa, la crisis de Corea, etc. En tanto, el mayor problema se dio hacia el final de la década de los 90 por efecto de un cambio en el contexto externo. En este sentido, Loser *et al* (2010) sintetizan claramente la situación³⁰:

La crisis Argentina (2001) es un ejemplo de un evento causado por la combinación de debilidades de los fundamentos macroeconómicos y del sector externo. Entre los problemas internos, pueden mencionarse los déficits gemelos, grandes requerimientos financieros relativos al tamaño del mercado de capitales interno y dolarización del sistema bancario con falta de prestamista de última instancia o

L

³⁰ La traducción es propia.

sistema de seguros de depósitos. En tanto, como la economía estaba atada a un tipo de cambio fijo, no tenía capacidad de adaptación frente a desajustes externos. Mientras que el resto del mundo crecía y estaba dispuesto a financiar al país, la economía interna encontró la forma de expandirse e incluso permaneció financieramente estable. No obstante, cuando las condiciones externas cambiaron (revaluación del dólar, incremento de las tasas de EE.UU. y caída del precio de los *commodities*), se puso en duda la sustentabilidad del tipo de cambio fijo y la capacidad de obtener financiamiento. En poco tiempo, Argentina enfrentaba la peor crisis económica y financiera de la historia reciente. Nuevamente, el problema fue la debilidad de los fundamentals y el disparador fue el cambio en las condiciones externas.

En contraposición, el modelo implementado a partir del 2002 se caracterizó por las siguientes características:

- Régimen cambiario flexible, con flotación administrada
- Resultado fiscal superavitario, en consonancia con el bloque latinoamericano
- Restricciones a las importaciones, en primera instancia por efectos del tipo de cambio y luego por restricciones informales (complejización de los procedimientos administrativos) y formales (establecimiento de cupos u obligación de balanceo con exportaciones).
- La cuenta corriente se mantiene superavitaria, en consonancia con el bloque latinoamericano
- El sistema previsional vuelve a la égida estatal, bajo el sistema reparto, recuperándose los ingresos de la seguridad social como recursos del tesoro.
- Se altera el marco regulatorio de los servicios públicos, regulando la aplicación de ajustes tarifarios y regresando algunas empresas al ámbito del estado.
- Incremento de reservas genuino (vía superávit del comercio exterior)
- Proceso de desendeudamiento

Tabla N°12: Resumen comparativo de características macro de Argentina

	1993-2001	2002-2011
Régimen cambiario	Caja de conversión	Flotación administrada
Resultado Fiscal	Deficitario	Superavitario
Patrón comercio interior	Apertura casi indiscriminada de la importación	Mercado internismo (vía tipo de cambio y restricciones formales)
Cuenta Corriente	Deficitaria	Superavitaria
Sistema jubilatorio	Capitalización individual (privado)	Régimen de reparto público
Servicios públicos	Privatizaciones (incremento de tarifas)	Re-estatizaciones (subsídios)
Deuda	Incremento	Desendeudamiento

Fuente: elaboración propia

Comparando los escenarios planteados, se concluye que la estructura fue proclive a ser amplificadora de *shocks* durante el período 1993-2001, a tener mayor capacidad de amortiguación en el segundo período. Nótese de acuerdo a lo anterior cual fue la performance de la economía argentina durante la crisis internacional. Básicamente, puede afirmarse que fue uno de los países menos afectados por la misma, al menos en términos de resultado fiscal, cuenta corriente e impacto socioeconómico, tal como fue expuesto en el punto 4.2.2 "La situación de América Latina".

Cuáles son entonces algunas de las dimensiones que deberían observarse para determinar el nivel de vulnerabilidad (y por ende riesgo endógeno) en vistas del caso estudiado. Algunas se detallan a continuación:

- El nivel de flexibilidad del tipo de cambio
- La diversidad de la estructura productiva
- La diversidad del patrón del comercio exterior
- La diversidad de la estructura impositiva
- La existencia de estabilizadores automáticos
- El sesgo a la prociclicidad
- La disponibilidad y capacidad de disponer de fuentes de financiamiento no tradicionales (reservas, recursos de la seguridad social, etc.).

Vale destacar que si bien todas son dimensiones de difícil cuantificación, el listado anterior servirá de base para tener una visión conceptual de la factibilidad de existencia de amplificación de *shocks* y volatilidad endógena.

Mediciones del riesgo soberano

Ahora bien, retomando las visiones tradicionales acerca del riesgo, el indicador indiscutido es el riesgo país.

Tradicionalmente la medición del riesgo soberano o "riesgo país" se realiza a través de la medición del diferencial de tasas implícitas de un conjunto de títulos públicos representativos, respecto a los títulos "libre de riesgo" (tradicionalmente bonos del tesoro americano). Este diferencial de tasas, denominado "*spread*", representa la "penalidad" que realiza el mercado de los títulos de deuda locales, tomándose como un indicador de riesgo de la inversión (en este caso el riesgo lo constituye la posibilidad de default parcial o total de la deuda).

No obstante, este indicador presenta algunos problemas:

- En primera instancia su *performance* puede ser afectada por ataques especulativos, sin que esto se corresponda con una falencia de la situación macro del país. En tales contextos puede estar sobre-estimado el riesgo.
- En mercados poco profundos puede subestimar el riesgo en tanto los activos sean adquiridos por entidades estatales o para-estatales.
- En segundo lugar es altamente volátil. Esto puede apreciarse rápidamente en el gráfico siguiente, donde se presenta la evolución del *spread* argentino en puntos básicos desde enero de 2000 hasta la actualidad.

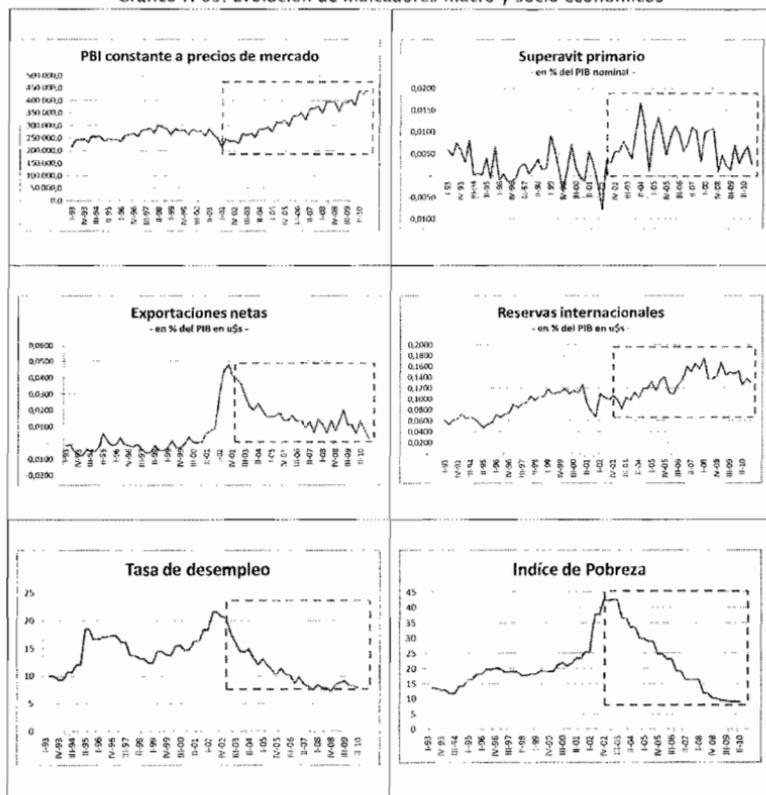
Gráfico N°64: Evolución del riesgo país medido a través del *spread* J.P. Morgan



Fuente: Elaboración propia en base a datos del Ministerio de Economía

Nótese que el *spread* se mantiene elevado durante todo el 2004, cuando el nivel de actividad y la situación socioeconómica de Argentina mostraba claros signos de recuperación. No obstante, el punto fundamental es la caída estrepitosa que se genera en junio de 2005, cuando el *spread* pasa de 6607 puntos básicos a 910 puntos básicos entre el 10 y el 13 del citado mes. Este hecho claramente evidencia que esta medición del riesgo pasa más por una cuestión de expectativas del sector financiero más que por una representación fiel de los *fundamentals* de la economía. Por tal motivo a continuación se presenta un breve relevamiento de la performance los principales *fundamentals* de la economía argentina.

Gráfico N°65: Evolución de indicadores macro y socio económicos



Fuente: Elaboración propia en base a datos del Ministerio de Economía

Nótese que durante la década de 90 el comportamiento de los *fundamentals* no fue del todo consistente, en el sentido que se observan periodos de crecimiento, recesión, la crisis del tequila, etc., conviniendo asimismo con algunos periodos de déficit primario y casi siempre con déficit de cuenta corriente. Asimismo, se observa una tendencia al empeoramiento de los indicadores socioeconómicos.

En tanto, luego de la crisis del 2002, se da un mejoramiento sistémico en todos los frentes (prácticamente la única variable adversa sería la inflación).

Como resulta un tanto complicado observar al mismo tiempo todos los frentes, se ha elaborado un índice sintético que resume la performance de un conjunto de *fundamentals* seleccionados. A los fines de compararlo con el riesgo país, ha construido un indicador de riesgo, el que será denominado de riesgo sistémico.

En el cuadro siguiente se compara la evolución del riesgo país (spread) con la medición del riesgo sistémico.

Gráfico N°66: Comparación entre riesgo país (J.P. Morgan) e Indicador de riesgo sistémico



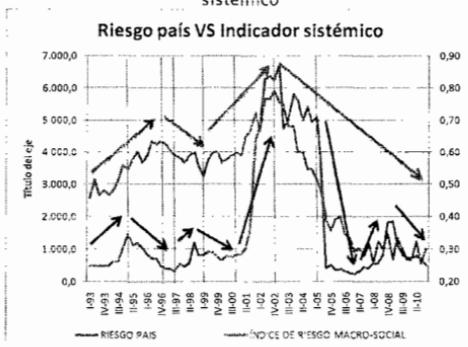
Fuente: Elaboración propia en base a datos del Ministerio de Economía

Se observa que claramente el riesgo país es un indicador extremadamente volátil por un lado e inviable para pronosticar el riesgo por otro. Nótese como se dan los saltos a la suba y a la baja. En este sentido, la capacidad de pago de la deuda argentina, paso ser nula en cuestión de días y volvió a ser viable también en cuestión de días... Es llamativo como el incremento estrepitoso del índice se genere ante el anuncio de default, sin reaccionar en forma previa.

En contraste, el indicador sistémico parecería dar una mejor representación del riesgo de macroeconomía argentina, medida a través de sus *fundamentals*.

Por otro lado, al observar la evolución a lo largo de distintos segmentos de la serie temporal evaluada, se observa que en ciertos períodos a los indicadores van en direcciones opuestas. Por ejemplo, durante 1993 y el cuarto trimestre de 1996 el indicador sistémico subió en forma continua. En el mismo período el riesgo país genera un pico durante el tequila para luego disminuir hasta el tercer trimestre de 2007. Además, en el preludio de la crisis del 2001, el indicador sistémico ostenta una fase de crecimiento sostenido a partir del primer trimestre de 2009, esto es, un año antes de que reaccione el riesgo país (primer trimestre de 2000).

Gráfico N°66 bis: Comparación entre riesgo país (J.P. Morgan) e Indicador de riesgo sistémico



Fuente: Elaboración propia en base a datos del Ministerio de Economía

Por lo tanto surge nuevamente el interrogante de qué *proxy* utilizar para estimar el riesgo. La visión tradicional toma al riesgo país como la segunda componente luego de la tasa internacional libre de riesgo para fijar la tasa de corte para cualquier inversión (real o financiera). Pero nótese que al menos en el caso de la economía argentina el indicador mencionado sobre-estima o subestima el riesgo vinculado a la performance macroeconómica.

Pueden resumirse tres visiones:

1. La visión de las expectativas del mercado (spread de bonos soberanos) – visión residual
2. La visión sistémica (cuantificable) – visión de los *fundamentals*
3. La visión de la capacidad de la economía para amortiguar o amplificar *shocks* (no cuantificable pero diagnosticable) – visión emergente

La propuesta que se da en este trabajo, para el caso del análisis macroeconómico, es la combinación de 2 y 3. Es decir, medir la *performance* actual de la economía en base al estado de sus *fundamentals*, y complementarla con la visión futura en función de diagnóstico de factibilidad existencia de estructura amplificadora de *shocks*.

La visión del *spread* constituye el método más ampliamente utilizado y consensuado, pero reviste de serios problemas en el caso analizado. Debe tenerse en cuenta que este indicador será mas o menos confiable dependiendo de la profundidad del mercado, en el sentido que por un lado deben existir activos comparables y por otro lado que los mismos estén lo suficientemente dispersos como para que su cotización no pueda ser controlada por un conjunto de tenedores altamente concentrados. No obstante una de sus principales virtudes es de tipo operativo, es decir, el valor de índice se calcula en forma diaria y es de disponibilidad inmediata para sus suscriptores.

La visión sistémica parecería ser la mejor representación de la *performance* macroeconómica (y en última instancia de la capacidad de pago). No obstante, es un indicador de tipo descriptivo. Si bien puede brindar alertas tempranas, muchas veces están sujetas a la disponibilidad de información macroeconómica. No obstante, claramente arroja una tendencia estructural del estado de la economía y reacciona en forma más anticipada que el *spread*. En tanto, una limitación importantísima, que fue mencionada en el marco teórico es que muchas veces se generan cambios en ciertas variables fundamentales sin observarse cambios en los *fundamentals*. Una implicancia directa es que incluso frente a un buen diagnóstico de las variables fundamentales no es posible determinar el comportamiento de los precios de los activos (Loser *et al*, 2010).

Por último esta la visión emergentista, en el sentido definido en el marco teórico de este trabajo. En este caso, se refiere una estructura económica que sea no solamente vulnerable sino, como fue desarrollado en la sección anterior, tendiente a la amplificación de *shocks*. Esto es, que diversas perturbaciones exógenas "despierten" todo un conjunto de componentes endógenos de volatilidad. Esta visión del riesgo es sin lugar a dudas la más importante de todas, porque es justamente la potencialidad del evento extremo. No obstante, como fue dicho, la amplificación de *shocks* no es una dimensión cuantificable. Nótese que el indicador riesgo sistémico se va incrementado pero también termina en un estallido. Es decir, el resultado es una amplificación extrema (en el caso estudiado, generó un cambio profundo en las instituciones económicas). Y el meollo de la cuestión radica en que esa amplificación esa concentrada en muy poco tiempo y es poco medible a partir de los indicadores tradicionales. Empero, sí es diagnosticable.

Un ejemplo ya descrito es el caso de la economía argentina, la cual ostento durante la década del 90 una estructura tendiente a amplificar perturbaciones, a diferencia del contexto actual.

Por otro lado, es aceptado que la economía argentina fue relativamente menos afectada que el promedio Latinoamérica, al menos en lo que hace al resultado fiscal y al impacto en el empleo y el producto. No obstante, de acuerdo a Kacef (2009), Argentina mostró la intervención más activa, con medidas que implican un costo de alrededor del 6% del PIB, contra 3,6% de Brasil y entre un 2% y un 2,8% en los casos de Chile, Colombia, México y Perú. Es decir, Argentina fue menos perjudicado, ¿pero a que costo? En este sentido, ¿la absorción del *shock* fue por el estado de la estructura o por la fuerte intervención fiscal aplicada? No se persigue como objetivo responder a este interrogante, pero el planteo se vincula a dos cuestiones: la realidad que la Argentina contaba con una estructura macro muchísimo más flexible que en el pasado y la vigencia de condiciones iniciales más favorables vinculadas a la disponibilidad de recursos genuinos que pudieron orientarse a la política fiscal.

Otro caso que también fue descrito fueron aquellas economías latinoamericanas altamente dependientes del sector externo, ya sea vía comercio internacional, turismo y/o remesas, que claramente fueron las más afectadas durante la crisis internacional del 2008. En estos casos, la performance macroeconómica durante el período pre-crisis fue una de las mejores épocas para estas economías, en el marco del contexto de crecimiento mundial. Empero, nótese que ostentaban un riesgo emergente implícito muy elevado. Es decir, la dependencia del sector externo no se daba solamente en el sector real, sino que también afecta al financiamiento del sector público (ingresos ligados a los sectores externos) reduciendo el margen de acción a través del frente fiscal vía reducción de ingresos genuinos y vía cerramiento del mercado de crédito internacional.

Ahora bien, para dar un ejemplo prospectivo, puede citarse un caso algo extremo. La economía chilena es habitualmente citada como un ejemplo de estabilización macroeconómica, desarrollo de las instituciones internas combinado con cierto mejoramiento de la situación socioeconómica. No obstante, no ha logrado diversificar su estructura productiva y sus ingresos fiscales como para "amortiguar" posibles embates desde el sector externo. En otras palabras, ¿qué pasaría ante una inminente baja en la demanda o en el precio del cobre? En este sentido, desde la perspectiva planteada el riesgo emergente actual serpia muy alto, improbable en el corto plazo, pero endógenamente muy peligroso.

Otro ejemplo es el caso ya desarrollado de la crisis financiera internacional, en el sentido que ante la reversión de un flujo, la estructura del mercado era tal que generó un efecto cascada de muy rápida propagación, terminado en la quiebra de las más importantes instituciones financieras del mercado mundial.

Si bien era un riesgo implícito que no estaba cuantificado, sí era una estructura que estaba diagnosticada. Por ejemplo, Crouhy et al (2006), claramente sintetizaron el riesgo de tasa implícito en el mercado hipotecario americano mucho antes del estallido de la crisis sub-prime:

In 2004, according to the Office of the Comptroller of the Currency (OCC), mortgage-related assets, which include mortgages and mortgage-backed securities (MBSs), made up 28 percent of U.S. commercial banks' assets. Like fixed-interest government bonds, these assets fall in value when interest rates rise. Worse, MBSs suffer from "extension risk" because consumers have the option to extend the duration of the loan when interest rates go up (making the value of the instruments much more sensitive to rising rates); borrowers also have the option to pre-pay their mortgage when interest rates decline. This needs no matter if banks have carefully hedged their exposure, but it can otherwise lead to huge losses.

En síntesis, deben identificarse dos puntos de la visión emergentista desarrolladas en este trabajo:

- La posibilidad de que la estructura macroeconómica en el caso de las economías latinoamericanas, de mercado en el caso la crisis *subprime*-propague en forma creciente los efectos de un *shock* ("amplifique"), derramando sus efectos a todo el sistema.
- La posibilidad que se observen movimientos en ciertas variables (generalmente vinculadas al mercado financiero) totalmente ajenas al estado de los *fundamentals*. Esta situación se vincula al comportamiento de los agentes, y en muchos casos se explica por la hipótesis de sobre-reacción. Si bien esto ya fue mencionado, será complementado en el apartado siguiente.

4.2.5. Tópicos del marco propuesto

En este apartado se intentará sintetizar y complementar los temas tratados. Básicamente, se puntualizará en los siguientes ejes:

- Cuáles son las situaciones de riesgo a las cuales se hace referencia
- El emergente puramente endógeno y en emergente como reacción al *shock*

- Aplicaciones de la teoría del caos: exponente de Lyapunov
- Microfundamentación: el fenómeno de la sobre-reacción
- Crisis y cambio estructural: visión analítica o meta-modelo

Los mismos se resumen a continuación.

4.2.5.1. Locus del riesgo

La pregunta fundamental es la siguiente: ¿las situaciones de riesgo, se dan en forma aleatoria, idénticamente distribuida o se concentran en períodos muy cortos?

La respuesta a esta pregunta es totalmente obvia y ya fue respondida por la literatura hace ya muchos años, y se vincula a los hechos estilizados de las distribuciones de rendimientos de los activos (bursátiles), como la heteroscedastilidad, el clustering y la leptocurtosis.

No obstante, en este trabajo se da un paso más allá en la interpretación del riesgo, y se lo vincula a la dinámica emergente, la cual por lo general (aunque no siempre) esta asociada a un cambio estructural.

En este sentido, un caso paradigmático estudiado es la crisis financiera internacional. Otro es el mencionado caso de Argentina, donde la crisis del 2001 implosionó de forma abrupta, generando un cambio de estructura en el sistema económico. De esta forma, la visión del riesgo emergente introducida en este trabajo esta asociada a eventos de cambios extremos en los valores de las variables, donde también se generan cambios en la concepción estructural del sistema y, generalmente, en las creencias de los agentes.

Ahora bien, los dos casos enunciados corresponden a emergentes endógenos. No obstante, también fue puesto como ejemplo, sobre bases exploratorias, el concepto de amplificación de *shock* (impacto de la crisis sobre el bloque latinoamericano). Ambos casos se sintetizan a continuación.

4.2.5.2. Emergente endógeno y emergente reactivo

Los casos de estudio grafican dos perspectivas del modelo planteado. En primer lugar ambos sistemas (el mercado de capitales mundial por un lado y la performance macroeconómica del bloque latinoamericano por otro) se encontraban en senderos que, de acuerdo a la visión tradicional, se hubiesen catalogado como de "equilibrio".

En segundo lugar la implosión de la crisis en el mercado americano fue puramente endógena. Es decir, el "equilibrio" fue el preludio de un evento emergente autogenerado por la propia estructura del sistema.

En tanto, la afectación del bloque latinoamericano fue producto de un *shock* exógeno. No obstante, el impacto sobre el promedio de las economías del bloque fue muy pronunciado, generando un efecto arrastre al conjunto de la economía. Lejos de ser absorbidos en forma automática, se observaron fuertes impactos que debieron ser atendidos con grandes intervenciones del sector público (uno de los factores que contuvo la amplificación fueron los ahorros previos (fiscales y monetarios) que permitieron aplicar recursos para la reactivación económica).

En este sentido, se identifican dos aristas: el emergente puramente endógeno y el emergente generado por una perturbación exógena.

Con esto se intenta postular que no adscribe ni a una visión puramente endógena ni puramente exógena. Se propone la visión de un sistema complejo que reacciona en forma diferenciada a diversos *shocks*, pudiendo generar amplificación o amortiguación de acuerdo a la estructura (de mercado o macroeconómica) vigente.

No obstante, para la existencia de propagación dinámica, sí o si deben aflorar los mecanismos endógenos (Kirman, 2011). Esto implica que los cambios endógenos son mucho más importantes que los *shocks* exógenos. En relación a la crisis bursátil propiamente dicha, se registra una estructura de interacción e interdependencia, donde emergió una ruptura de la confianza, no un *shock* exógeno en un mercado estable (Kirman, 2011).

Este caso fue verificado sobre bases teóricas, a través de un modelo simple que con una perturbación exógena débil en el sentido de Mandelbrot (1967) genera dinámica emergente.

4.2.5.3. Aplicaciones de la teoría del caos

En sus inicios, los intentos de aplicación de la teoría del caos (principalmente al ámbito financiero) tuvieron como objetivo la reconstrucción del atractor del sistema, o bien la estimación de sistemas no lineales con el fin de generar predicciones.

En cierta forma, demasiada atención estuvo puesta en "desenmascarar" la estructura o patrón que gobierna el cambio en los precios de los activos, dado que de acuerdo a la dinámica caótica la supuesta aleatoriedad puede ser fruto de un sistema determinista con dinámica endógena. Vale destacar que, en general, los resultados de estas investigaciones no han sido favorables.

Por ello, el eje de este trabajo no está puesto en la predicción sino en la clasificación del riesgo. En este sentido, se identifican dos áreas de aplicación concreta de la teoría, una cuantitativa y otra cualitativa.

La cuantitativa está referida a la aplicación del concepto de sensibilidad a las condiciones iniciales a una serie temporal, en nuestro caso, a los precios de los activos bursátiles. De comprobarse esta hipótesis (que el activo presente SCI), es un paso adicional para la medición del riesgo, y estaría graficando un contexto de amplificación de *shocks* y de extrema incertidumbre.

Respecto a esto cabe mencionar que aún no existen trabajos sobre bases empíricas que vinculen a la dinámica caótica con procesos de burbujas y crisis ("*bubbles and crashes*"). De acuerdo a Vogel (2010), esto puede deberse a la extrema dificultad de definir tales fenómenos en el marco de la hipótesis de expectativas racionales. No obstante, Vogel (2010) sostiene que los procesos mencionados sí pueden ser descritos a través de elementos de la teoría del caos, básicamente la SCI antes mencionada, la cual ha sido testada en forma más convincente en la fase de crisis más que en la fase de burbuja. Esta aseveración es coincidente con resultados alcanzados en el índice merval (véase Thomasz, 2010).

Ahora bien, lo anterior refiere a la observación de la serie temporal. Pero, desde la óptica generativa propuesta en este trabajo, es necesario vincular la dinámica de la variable con su proceso generador. En este caso, el proceso generador está dado por el conjunto de agentes en interacción que compran o venden activos (en el caso del mercado bursátil).

En este sentido, surge el interrogante de si resulta loable la aplicación del concepto de SCI al comportamiento de los agentes. Para responder a esto hace falta indagar en la microfundamentación del comportamiento de los agentes. Este tema se trata a continuación.

4.2.5.4. Microfundamentación

No es el objetivo de este trabajo centrarse en la teoría de estos aspectos, sino más bien tomarlos como un hecho estilizado que coadyuda a la generación de amplificación de *shocks* (exógenos o endógenos).

Si se está estudiando la factibilidad de aplicar el concepto de sensibilidad a las condiciones iniciales al comportamiento de los agentes, en primera instancia surge cabe preguntarse algo más simple, es decir, ¿sobre-reaccionan los agentes?

Para responder a este interrogante primero es necesario definir qué se esta entendiendo por "sobre-reacción", y para ello es resulta conveniente resumir brevemente el esquema clásico de reacción.

Básicamente, los modelos tradicionales adhieren al esquema bayesiano de análisis. Esto significa que los agente evalúan la incertidumbre en forma probabilística, revén tales evaluaciones a la luz de nueva información a través de mecanismos bayesianos de actualización, y elijen el curso de acción que maximiza su utilidad esperada. Este mecanismo implica actualizar el set de creencias en vistas de la nueva información disponible. Si dicha información no es relevante, nada debería cambiar, y si dicha información es relevante, posiblemente cambie el curso de acción de los agentes. En síntesis, existe un vínculo directo entre la magnitud del ingreso de nueva información y la magnitud de la reacción.

Una sobre-reacción, entonces, puede definirse como una respuesta de mayor magnitud en relación a la nueva información recibida ("al *shock*"), tomando como referencia la respuesta que se hubiese generado dentro de un esquema bayesiano.

En primer lugar, vale destacar que ya hacia 1982 Kahneman y Tversky concluyeron que los agentes no siguen el esquema bayesiano de decisión dado que los individuos dan mucho mas peso a la información reciente que la pasada. Esto implica que los agentes subestiman los promedios de largo plazo, observándose un sesgo a favor de ponderar con mayor peso la experiencia reciente. Esto es lo que habitualmente se denomina "ley de los pequeños números" (Ritter, 2003).

Dentro del marco descripto, Werner et al. (1993) testean la hipótesis de sobrerreacción en el mercado bursátil, concluyendo a favor de la misma cuando los agentes se enfrentan a nueva información acerca de eventos dramáticos e inesperados.

En relación a los mecanismos de la sobrerreacción, muchos estudios se centran en las fallas de interpretación y en la generación de cascadas informacionales. Las teorías acerca de cascadas informacionales son teorías de fallas de información vinculadas a la evaluación y diseminación de valuaciones de los *fundamentals*. Esto implica que, si bien el comportamiento individual puede ser racional, genera un comportamiento agregado que es, en cierto sentido, irracional. Este tipo de situaciones son generalmente provocadas por las mencionadas cascadas informacionales (Schiller, 2000)

Ahora bien, si el mecanismo de forzamiento del sistema es la nueva información que ingresa al mismo, un punto importante es cómo se genera dicha información o, mejor dicho, cómo se procede a su transmisión, teniendo en cuenta que la comunicación

entre agentes puede tener un profundo impacto en el comportamiento de un sistema complejo (Miller & Page, 2007). En el apartado 3.3.6.3, se presentó un modelo de transmisión de información "por contacto", tratando de representar el conocido proceso de "boca a boca". En el mismo se concluyó la posibilidad de que a veces la información tarda en llegar a todos por igual (leptocurtosis y colas anchas hacia la derecha).

No obstante, un tema que en general se excluye en tales modelos es la forma en la cual la información es transmitida, no entre los agentes, sino hacia los agentes. Esto no resulta un tema menor, dado que un eje central de la teoría habla del ingreso de nueva información, pero pocos estudios tratan de como se genera y transmite esa información. De acuerdo a Kasperson et al (1988) la amplificación de señales puede darse no solamente en la recepción sino también en el proceso de transmisión de la misma. Quien transmite estructura el mensaje que luego va al receptor. Este último es quién a su vez interpreta, asimila y evalúa los mensajes. Por su parte, el trasmisor envía el mensaje de acuerdo a reglas institucionales, juego de roles e intereses del receptor. Ergo, las señales que pasan a través de un transmisor pueden ser amplificadas por partida doble (por el transmisor por un lado y por el receptor por otro) (Kasperson et al, 1988).

Vinculado a lo anterior, Schiller (2000) estudia la influencia de los medios de comunicación en la propagación de burbujas especulativas. En este sentido Schiller (2000) concluye que de acuerdo a varios casos de estudio la información provista por los medios es un importante propagador de movimientos especulativos en los precios, a través del esfuerzo de los medios para que la información resulte interesante a la audiencia. El punto fundamental es que de acuerdo a Miller y Page (2007) los mecanismos de comunicaciones pueden alterar radicalmente el devenir de un sistema complejo.

Por otro lado, Mullainathan (2002) propone otra forma de explicar sobrerreacciones (y también sub-reacciones), sugiriendo que las expectativas se forman en función de categorías. Es decir, que los agentes forman escenarios o contextos delimitados de antemano, como por ejemplo un contexto malo, promedio o favorable, y catalogan dentro de esa clasificación las señales del mundo económico. Formaliza un modelo donde los agentes no actualizan en forma continua como establece puramente el mecanismo bayesiano, sino que cambian de categoría solamente cuando aprecian que hay suficiente información que sugiere que otra categoría se ajusta mejor a la interpretación del entorno.

Esto implica que bajo ciertas condiciones los individuos sub-reaccionan a nueva información, cuando la magnitud de la información no hace cambiar de categoría y por lo tanto no cambia la predicción (y por ende la reacción). En tanto, en otro contexto la información puede ser "pequeña" pero suficiente como para cambiar de categoría, generando un proceso de sobrereacción. En general siempre se registra sobrereacción cuando los individuos cambian de categoría (Mullainathan, 2002). En suma, puede sintetizarse el modelo como la ausencia de reacción ante noticias (que no implican "cambios de escenario"), y fuertes respuestas frente a novedades relativamente pequeñas ("gotas que rebalsan el vaso") (Heimman, 2007).

Otro efecto que se ha descrito en la literatura es el hecho que los agentes observan más la fuerza que el peso de la información para cambiar sus acciones. Hirshliefer (2001) ejemplifica que una serie "extensa" de información puede no ser muy relevante si las señales están compensadas. En cambio, cobra relevancia una serie corta pero donde la señales se han orientado en la misma dirección.

Ahora bien, un punto importante es si esas sobrereacciones generan cambios persistentes en la variable estudiada. Este interrogante arroja una respuesta positiva en el marco del mercado de capitales, dado que es y ha sido una de las áreas más estudiadas desde la perspectiva del comportamiento (*behavioral economics*). En este sentido, uno de los aportes teóricos del *behavioral finance* es que en un mercado donde interactúan agentes racionales e irracionales, la irracionalidad (por ejemplo, la sobrereacción agregada) puede tener un impacto substancial y persistente en los precios. Esto es conocido en la literatura como "límites al arbitraje" y conforma uno de los bloques constructivos del *behavioral finance* (Barberis y Thaler, 2003).

Ahora bien, cuál es otra de las explicaciones que puede darse a la sobrereacción. Otra respuesta puede encontrarse en el cambio de creencias. De acuerdo a la literatura, en general los agentes tienden a resistir los eventos que impliquen cambios de creencias. De acuerdo a Barberis y Thaler (2003), esto se da en dos aspectos. Primero, los individuos son desconfiados acerca de la información que contradice sus creencias. Segundo, aún en el caso que dicha información sea confirmada, es tratada con mucho escepticismo. Incluso, se han estudiado casos extremos donde los individuos reinterpretan los hechos que falsean la hipótesis en pos de que actúen en favor de ella, denominado efecto confirmación (Barberis y Thaler, 2003).

Vale destacar que esta cuestión no refiere al campo específico de las finanzas ni menos de la economía, sino que refiere a la construcción científica en general. En efecto, ya hacia 1931 Neurath sostuvo que frente a información que pone en jaque la

teoría, es muy difícil que los individuos actúen en favor de la evidencia y por lo tanto hacia una revisión del sistema que se estaba aplicando hasta ese momento. De acuerdo a Gärdenfors (1988) el punto clave es que, al cambiar las creencias, se intenta retener la mayor parte posible de las viejas creencias – la información no es gratuita y debe evitarse pérdidas innecesarias de la misma (Rott, 2002).

La cuestión del cambio de creencias puede jugar a favor de una reacción no lineal por parte de los agentes. No lineal en el sentido que las señales pueden no ser interpretadas debidamente en el marco de la teoría vigente. Pero cuando la evidencia supera las predicciones de la teoría, puede generarse un cambio de creencias (si bien parcial, de acuerdo a Gärdenfors (1988)) que implique una reacción drástica, es decir, una sobre-reacción. En lo que hace a la economía, el cambio de creencias está mayormente asociado a períodos de crisis donde subsiguen cambios estructurales (por ejemplo, la convicción de que el mercado no se regula en forma automática), tema que será tratado en el apartado siguiente.

En síntesis, se han resumido argumentos a favor de la posibilidad de sobre-reacción de los agentes frente a distintas señales del entorno. En relación a esto se mencionó el efecto de la subestimación de los promedios de largo plazo, donde la información reciente tiene mucho más peso que la historia pasada, la generación de cascadas informacionales, la influencia de los medios en la transmisión de información, la estructura de pronóstico en términos de categorías o escenarios, la mayor influencia relativa de la fuerza o intensidad de la señal respecto a su peso (masa crítica histórica) y por último el tema del cambio de creencias.

Vale destacar que todos los anteriores configuran microfundamentos que avalan la hipótesis de sobre-reacción por parte de los agentes.

Ahora bien, ¿pueden darse de casos de sobre-reacciones frente a señales mínimas? La respuesta es afirmativa en el caso del cambio de categoría en el sentido de Mullainathan (2002) y posiblemente frente a un cambio de creencias. Estos configurarían argumentos a favor de la existencia de sensibilidad a las condiciones iniciales en agentes económicos.

Asimismo, Kasperson (1988), al analizar los procesos de amplificación social del riesgo, sostiene que si existe algún tipo de riesgo que es particularmente temido, un simple rumor puede ser un elemento significativo para la formación de percepciones y expectativas por parte de los agentes³¹.

³¹ La historia reciente de la economía Argentina ostenta algunos ejemplos, siempre vinculado a rumores sobre el dólar y la tangibilidad de los depósitos en dólares (principalmente el contexto de la crisis del campo del 2008 y durante y después de la elección presidencial del 2011).

En general, estos tipos de sobre-reacción extrema estarían mayormente asociados a contextos de crisis. Por tal motivo, a continuación se resumen algunos comentarios respecto a los cambios estructurales.

4.2.5.5. Crisis y cambio estructural: visión analítica

Uno de los fenómenos que justifica la aplicación de la dinámica compleja como visión analítica de análisis es, justamente, la existencia de crisis. O, mejor dicho, la secuencia crisis-recuperación.

En este caso, se está haciendo referencia a crisis sistémicas, en las cuales se generan importantes cambios en el marco institucional y en las creencias de los agentes. Por ejemplo, se está haciendo referencia a las clásicas crisis latinoamericanas, casi en su totalidad de índole macroeconómica, vinculadas a estallidos hiperinflacionarios, mega-devaluaciones, cesación de pagos, corridas bancarias, etc. No obstante, también puede incluirse, como será discutido más adelante, la reciente crisis sub-prime.

Ahora bien ¿Cuáles son las características comunes que hacen que este tipo de crisis sean loables de ser analizadas mediante la dinámica compleja?: básicamente el cambio estructural. Es decir, toda crisis genera en su epicentro profundas fluctuaciones y ajustes de variables relevantes (tipo de cambio, precios relativos, resultado fiscal, desempleo, pobreza, etc.), pero posteriormente el sistema "muta" hacia otro período transicional donde se observa una baja relativa de tales fluctuaciones. Es decir, un desajuste que es corregido por el propio sistema y no genera cambios en su estructura corresponde a la visión tradicional, mientras que el caso contrario (un sistema que genere una profundización de la crisis sin límites) corresponde a un modelo divergente que no se corresponde con los hechos estilizados del mundo económico.

El problema principal es que en principio no existe "teoría de la crisis". En este sentido, de acuerdo a Heimann (2007), *las altas inflaciones y las crisis macroeconómicas que han experimentado economías "emergentes" plantean preguntas difíciles al análisis, del tipo que este sea. Resulta natural que se hayan buscado intensamente formas de incorporar a esos fenómenos dentro de los esquemas usuales. Sin embargo, quedan problemas que parecen derivar de un contraste entre las grandes perturbaciones macroeconómicas y las hipótesis básicas de esos modelos. Parece difícil disociar a las crisis de shocks sobre los mecanismos de decisión de los agentes, que ponen en duda a los esquemas con que ellos organizaban sus percepciones, y se constituyen en acontecimientos "memorables", que generan aprendizajes y cambios en opiniones e interpretaciones.* Por su parte, Fanelli (2007) sostiene que un *modelo basado en el*

núcleo duro del pensamiento macroeconómico no es fácil de aplicar para elucidar problemas de acción colectiva, conflicto distributivo, fallas de coordinación, instituciones, cambios de régimen y aprendizaje

En la visión tradicional, se asumía que el valor de equilibrio de estas variables dependía de determinantes de largo plazo que no eran afectados por desequilibrios de corto plazo. Los desequilibrios de corto plazo sólo podían sacar a la economía de su sendero de largo plazo de manera transitoria. De esto se seguía que, si bien los desequilibrios macro podían afectar el nivel de bienestar por un tiempo, no podían aumentar o disminuir el nivel del PBI per cápita de equilibrio de largo plazo de manera permanente. Una vez procesado el shock de corto plazo, la economía revertía a su sendero de largo plazo. Las perturbaciones de corto no inducían nunca efectos de quiebre estructural, asociados a *path dependence* (Fanelli, 2007).

Respecto a lo anterior, una de las visiones analíticas del análisis macroeconómico se corresponde al mencionado fenómeno del *path dependence*. Por ello, corresponde hacer una breve mención respecto a este concepto. Al igual que en el caso del caos, el concepto ha tenido algunos errores de interpretación.

La concepción vulgar del fenómeno de *path dependence* se vincula a que el estado, las acciones y decisiones presentes y futuras depende de las trayectorias pasadas de esos estados, acciones y decisiones (Page, 2006).

No obstante, en términos más técnicos un campo de discusión importante se encuentra en la supuesta vinculación de este fenómeno con la teoría del caos. En principio, porque buena parte de la literatura sobre *path dependence* habla de la dependencia de las condiciones iniciales para la explicación de ciertos fenómenos. Respecto a esto, Liebowitz & Margolis (1999) sostiene que los conceptos relacionados en física y matemática provienen de la teoría del caos, donde un potencial radica en la sensibilidad a las condiciones iniciales: "determinación y tal vez *lock-in* dados por pequeños e insignificantes eventos".

No obstante, si bien aparentemente parecería haber algunas similitudes (o derivaciones) entre ambos conceptos, en principio la vinculación es incorrecta (David, 2000). El punto fundamental es la confusión entre un sistema estocástico (el *path dependence*) y un sistema en principio determinista (el caos). De acuerdo a David (2000), esto refleja una predilección común entre los economistas del *mainstream* en transpolar conceptos y argumentos de naturaleza estocástica en simples sistemas deterministas.

En la misma línea, Page (2006) aduce que el error está en la vinculación la idea de dependencia del sendero con pequeñas diferencias que se van magnificando a medida que se aplica la función iterativa (caos). En contraste, la dependencia del sendero

describe un proceso donde distintas perturbaciones estocásticas afectan "forma" a la distribución de probabilidad. Es decir, no la determinan sino que le dan "forma" (Page, 2006).

En tanto, el marco analítico que se propone en este trabajo comprende la aplicación de la dinámica caótica como visión analítica para explicar dos fenómenos:

- La amplificación de *shocks* dado una configuración particular de la estructura del sistema (en caso exploratorio planteado, la estructura macroeconómica)
- El fenómeno de sobre-reacción de los agentes, ante mínimas señales de información (al momento de la sobre-reacción).

Nótese que, dentro de un sendero caótico, no existiría *path dependance* dado que el caos es, en principio, un proceso sin memoria. Si bien resulta altamente dependiente a las condiciones iniciales, la entropía se incrementa fuertemente a medida que el sistema evoluciona, siendo imposible en el mediano plazo vincular al estado del sistema con la mencionada configuración inicial. En un sendero caótico, muchas veces resulta imposible vincular al *shock* con la evolución ulterior.

Por tales motivos, el locus de aplicación del caos en sistemas económicos esta asociada a períodos de crisis extremas, donde se diluyen las estructuras (instituciones) de los mismos³². Por tal motivo en este apartado se hace referencia al cambio estructural. En este sentido, la dinámica compleja es una herramienta que permite vincular la transición de un estado de pseudo-equilibrio³³ a un estado caótico. Es decir, la dinámica compleja es un sistema que logra vincular la crisis con senderos de estabilidad, asociados a proceso de organización espontánea.

Respecto a esto, a continuación se cita un ejemplo paradigmático vinculado a la crisis Argentina, descripto por Muñoz (2011) en Teoría del Caos: Aplicaciones al estudio del Riesgo Financiero y Económico:

Analicemos una variable muy importante en las ciencias sociales: la actitud de las personas. Durante la crisis del 2001, se pudo observar la brecha "caótica" de la gente, con manifestaciones permanentes en las calles y aumentando la desconfianza hacia los bancos. Con el correr del tiempo y frente a nuevos cambios en el entorno, las personas comenzaron a autoorganizarse y la situación caótica comenzó a disminuir.

L

³² Vale destacar que el caso de estudio referencia al impacto de la crisis en Latinoamérica constituye una aplicación parcial de la teoría solamente asociada al concepto de amplificación de *shocks*.

³³ La palabra *pseudo-equilibrio* se utiliza solamente para hacer una distinción de la idea de equilibrio en el sentido tradicional. Tal como fue descripto en el marco teórico de este trabajo, si el sistema es complejo, un sendero de equilibrio es una característica transitoria y no permanente del mismo.

Hoy, con cambios en el entorno, vemos que por un lado las personas están volviendo a invertir, buscando otros caminos, y esta búsqueda, con el tiempo, lleva a un nuevo orden. Por lo tanto, en la actualidad, existe aún la desconfianza a los bancos, pero por otro lado se tiende a un nuevo orden. Esta mezcla de brecha caótica y nuevo orden origina una situación COMPLEJA.

El sistema argentino parecería tener muchos casos de histeria colectiva, lo que implica una alta sensibilidad de los agentes y por lo tanto mayor capacidad de generar dinámica emergente e incluso caos. En esto parecerían ser muy influyentes los "los fantasmas del pasado": megacrisis que marcaron a fuego la experiencia de los agentes. Como mínimo pueden citarse la hiperinflación de 1989 y el corralito, pesificación asimétrica y megadevaluación del 2002. Estos hechos se encuentran de alguna forma latentes en la memoria colectiva y generan acciones motivadas en base a rumores ("van a pesificar los depósitos", "van a abrir las cajas de seguridad", etc.) que no se sustentan ni en nueva información ni en un cambio en los *fundamentals*, pero que generan fuertes problemas macroeconómicos (en el caso particular de Argentina, principalmente la fuga de capitales que restringe la oferta de dólares, necesarios para la importación y para afrontar los vencimientos de la deuda pública).

Si bien los hechos estilizados descriptos del caso argentino son bien conocidos, no hay construcción teórica, o meta-modelo, que los expliquen forma completa o, mejor dicho, desde un enfoque transicional. De acuerdo a Schuschny (2000) muchos sistemas transitan por estados metaestables de larga duración, "avalando la idea de que muchas veces es necesario entender a los sistemas económicos a partir de sus estados transicionales y no tanto en términos de sus estados de equilibrio".

La dinámica compleja puede ser una respuesta en los casos en que se registren cambios estructurales, en coexistencia con los cambios de creencias de los agentes económicos. Vale destacar que esta propuesta se limita solamente a la visión analítica o meta-modelo, pero no a la aplicación de un modelo instrumental.

Por otro lado, los fenómenos de sobre reacción o amplificación social (Kasperson, 1988) sí o sí están vinculados al comportamiento de los agentes. En este sentido, Miller y Page (2007) concluyen una teoría completa de los sistemas sociales complejos adaptativos necesita una teoría del comportamiento adaptativo.

4.2.5.6. Síntesis

En síntesis, se ha intentado delimitar el campo de aplicación de la propuesta teórica como asimismo su microfundamentación.

Respecto al tipo de fenómeno estudiado, se ha hecho referencia al caso de crisis extremas, donde se pone en jaque la propia estructura del sistema (grandes crisis macroeconómicas latinoamericanas y crisis *subprime*, por ejemplo).

En relación al enfoque, se ha sugerido un enfoque mixto, donde el epicentro de la dinámica emergente puede ser puramente endógeno o en respuesta a un *shock* exógeno. No obstante, se destacó la importancia fundamental del entramado endógeno, siendo condición necesaria para la amplificación de perturbaciones.

Luego se hizo referencia a la vinculación de la teoría del caos con los casos de estudio planteados. Se comentó que a niveles cuantitativos la única aplicación concreta que ha generado resultados es la estimación del exponente de *Lypunov* en series temporales, verificándose efectos amplificadores de *shocks* en contextos de caídas extremas de los índices bursátiles ("*crashes*").

Luego se fundamentó en base a la literatura la posibilidad de sobre-reacción de los agentes económicos, poniendo algunos ejemplos donde la sobre-reacción puede ser entendida como caótica en el sentido de existencia de reacción frente a impulsos mínimos de información.

Por último, se hizo referencia a la aplicación de la dinámica compleja como meta-modelo de análisis para los sistemas económicos que mutan de estructura, siendo su característica natural la persistencia de estados transicionales entre crisis, recuperación y pseudo-estabilidad.

En síntesis, se da un entramado económico que transita sobre un sendero inestable (dadas las vulnerabilidades macro-fiscales antes descritas) que en reiterados casos generaron severos ajustes y cambios institucionales que encauzan al sistema dentro de un pseudo-equilibrio posterior (dinámica compleja). En este contexto, la componente de interacción social está dada por la sobre-reacción de los agentes, dada la memoria de los eventos extremos, que se da frente a señales que no necesariamente cambian los *fundamentals* del sistema.

En el caso argentino, este último punto puede resumirse en la siguiente frase: "*Usted debe entender que Argentina es un país que ha sufrido una significativa crisis social, política, y económica, y aunque las cosas son mejores ahora de lo que han sido durante mucho tiempo, la gente sólo parece esperar con cierta inevitabilidad el próximo choque*".

QUINTA PARTE

5. GESTIÓN DEL RIESGO

Esta sección del trabajo está dedicada a incluir los principales contenidos descriptos en un esquema o modelo de gestión del riesgo. Se hará hincapié en el eje angular del trabajo, es decir, en la gestión del riesgo emergente o, en otros términos, la gestión de la complejidad.

En primer lugar se hará un breve resumen de los procedimientos tradicionales de gestión del riesgo en instituciones financieras, para luego dar cuenta de estado del arte en lo que hace a la gestión bajo horizontes complejos.

5.1. El sistema tradicional de gestión del riesgo

De acuerdo a Jorion (2007) los principales factores de riesgo de una inversión son (i) el riesgo de mercado, (ii) el riesgo de crédito y (iii) el riesgo operacional. El primero se refiere a los movimientos propios de las variables que componen el mercado (tasas de interés, índices bursátiles, tipo de cambio, etc.), el segundo a la posibilidad de que la contraparte no cumpla parcial o totalmente con sus obligaciones (default) y el tercero a los errores producidos por los agentes que encarnan la gestión del *portfolio*.

En tanto, la gestión de tales riesgos se realizaba a través de herramientas *ad hoc*, como el control de montos nominales, el análisis de sensibilidad y el análisis de escenario. Respecto al primero, sólo provee una idea de la pérdida potencial, el segundo evalúa los impactos pero no su probabilidad de ocurrencia y lo mismo para el tercero. Esto es lo que Hull (2010) denomina gestión del riesgo por descomposición: implica identificar cada riesgo y gestionarlo en forma particular ("*delta*", "*gamma*" y "*vega*").

De acuerdo a Jorion (2007) la herramienta que supera los problemas mencionados, y logra medir todos los riesgos en forma simultánea es el VAR. Este enfoque es el que Hull (2010) denomina gestión del riesgo por agregación: implica aplicar el principio de diversificación para reducir el riesgo.

Tabla N° 13: Métodos de gestión del riesgo

	Stop loss	Nocional	Exposición	VAR
Tipo	Ex-post	Ex-ante	Ex-ante	Ex-ante
Fácil de calcular	Si	Si	No	No
Fácil de explicar	Si	Si	No	Si
Agregación	Si	No	No	Si

Fuente: *Elaboración propia en base a Jorion (2007)*

Ahora bien, ¿cuáles son las bases comunes de las herramientas técnicas aplicadas? Básicamente, todas adoptan el enfoque puramente estocástico, tratando de generar el mejor ajuste de los estimadores seleccionados a la muestra de datos analizada (en este caso series temporales) tomando como supuesto una distribución de probabilidad teórica o, en algunos casos, la generada por la historia de la serie. Si bien en muchos casos se aplica el supuesto de normalidad (tal como fue ampliamente desarrollado en el marco teórico de este trabajo) no es un principio excluyente. Es decir, la mayoría de los manuales de gestión del riesgo (como por ejemplo los ya citados Jorion (2007) y Hull (2010)) incorporan toda una variedad de distribuciones de probabilidad y diversos modelos econométricos para obtener un mejor ajuste de los estimadores de riesgo. No obstante, tales transformaciones no alteran el enfoque del análisis.

Además, vale recordar que las herramientas básicas fueron aplicadas al caso de estudio de los índices bursátiles durante la crisis internacional, mostrando una rotunda subestimación del riesgo, tanto desde el punto de vista paramétrico bajo el supuesto de normalidad como desde el punto de vista de la distribución empírica.

No obstante, Jorion (2010) reconoce que el método VAR no es garantía contra el riesgo de mercado si se aplica en forma aislada; y que el mismo debe ser combinado con límites sobre los nocionales y sobre exposiciones y, además, debe ser complementado con análisis de stress.

En este sentido, el *stress testing* tiene como objetivo la identificación de situaciones que pueden generar pérdidas extraordinarias a una institución (o cartera). Este proceso incluye el (1) análisis de escenario, (2) el stress de las volatilidades y correlaciones del

modelo y (3) eventualmente el desarrollo de políticas de respuesta frente a los resultados obtenidos.

Los escenarios pueden ser creados cambiando variables clave una a la vez (dado que resulta complicado replicar movimientos correlacionados entre variables en forma conjunta y es poco probable que todas lo hagan en la peor dirección al mismo tiempo), utilizando escenarios históricos (replicando la forma en la cual se movieron las variables en crisis pasadas) y creando escenarios prospectivos (generalmente simulando la peor situación para el portfolio).

Asimismo, el *stress testing* sirve para resguardarse frente a riesgos eventuales, como por ejemplo aquellos que se generan como resultado de cambios en el marco político y/o económico. El problema es que tales eventos son relativamente raros y difíciles de anticipar. Estos incluyen:

- Cambios en el gobierno, concatenando cambios en la política económica.
- Cambios en políticas económicas, tales como *defaults*, control de capitales, control de cambios, cambios en leyes impositivas, expropiaciones, etc.
- Guerras, invasiones u otros conflictos resultantes de la inestabilidad política.
- Devaluaciones, que generalmente son acompañadas de movimientos drásticos en otras variables.

Los manuales de finanzas sostienen que estos riesgos generalmente se asocian a los mercados emergentes. Si bien es posible hacer un listado de casos, tales mercados han sido "sistemáticamente tomados por sorpresa". Por ejemplo, pocas personas parecen haber anticipado el default ruso; en tanto que el argentino (2001-2002) fue único en varios aspectos (Jorion, 2007).

Vale destacar que el propio Jorion (2007) puntualiza en el caso argentino, donde identifica un factor de extrema imprevisibilidad. Reconoce que si bien era posible incorporar en el *stress test* la profunda devaluación del peso ocurrida en 2002, ningún analista hubiese pensado ni en forma más remota la pesificación asimétrica.

En síntesis, el planteo de la gestión del riesgo financiero se basa en la aplicación de las herramientas tradicionales bajo condiciones normales del mercado y en la complementación a través del *stress testing* para incorporar los escenarios no previstos por el mercado. Por ello, en rigor de lo sucedido en la crisis *subprime*, se esta poniendo gran atención en el *stress testing* y en el riesgo de liquidez (Hull, 2010).

Ahora bien, el punto crucial desde la óptica de este trabajo es que hasta el momento no se contempla el riesgo emergente generado por interacción, el cual es entendido

como la principal fuente de riesgo de un sistema. Los métodos antes descriptos por el momento dan un papel tangencial a este tipo de situaciones, utilizando como complemento (pero no como eje) el *stress testing*.

Por otro lado, tal como fue desarrollado, los mercados emergentes están sujetos a dinámicas complejas (dada la combinación de *shocks* exógenos con la volatilidad endógena, como por ejemplo el caso de amplificación ya mencionado), con lo cual cobra más relevancia la excepción (eventos extremos) que la regla (condiciones normales del mercado). Respecto a esto debe tenerse en claro que la mayoría de la crisis en Latinoamérica (para no decir la totalidad) tienen su epicentro en inconsistencias de tipo macroeconómico. Por ello, en emergentes los métodos tradicionales pierden aún más relevancia, dado que el riesgo macroeconómico fagocita al riesgo de mercado.

Por ello, uno de los mayores desafíos en los ejercicios de *stress-testing* es la habilidad de anticipar el peor escenario. Esta visión refuerza la necesidad de modelar *shocks* macroeconómicos y financieros, identificando la relación existente entre los *fundamentals* y sus efectos en las variables clave (Loser *et al.*, 2010).

En este sentido, las crisis recientes han demostrado que si bien los peores escenarios son difíciles de predecir, los mismos en efecto se generan pero habiendo previamente subestimado su probabilidad de ocurrencia. Las dificultades de prever estos episodios se vinculan a la dificultad de detección de evidencia o señales a partir de la información histórica, mientras que el uso de enfoques cuantitativos basados en el supuesto de normalidad subestima el peso de las colas y por lo tanto tiende a desestimar la ocurrencia de eventos extremos (Loser *et al.*, 2010).

En suma, si el principal factor de riesgo se encuentra en los sucesos extremos que se desvinculan de la historia previa, fenómeno que se ha denominado *dinámica emergente*, resulta trascendente determinar que enfoque se le dará a la gestión de estos escenarios. Este tema se trata a continuación.

5.1.1. Diagnóstico

En primer lugar, un punto crucial al momento de decidir la visión y el instrumento para gestionar el riesgo de una economía o un activo, es el diagnóstico de la situación y su entorno. Esto configura el primer escalón en el proceso de gestión.

Para dar el primer paso en la forma de realizar un diagnóstico, se apela al uso de la metáfora desarrollado por Lane y Maxfield (1995). Los autores plantean tres personajes que se enfrentan a distintos escenarios:

- Un general del siglo XVIII que analiza el campo de batalla del combate que se librará al día siguiente.
- Un comandante de caballería del siglo XIX que avanza hacia un objetivo determinado a través de un territorio desconocido (llegar a la costa oeste de los EE.UU).
- Un diplomático Bosnio en 1995 que intenta terminar con la matanza de su país: directamente no tiene claro quienes son sus enemigos y contrincantes. Cuando cree que sabe, éstos se cambian de bando al día siguiente.

Los tres enfrentan algún grado de incertidumbre, pero de distinto grado y tenor:

Respecto al horizonte temporal:

1. La incertidumbre tiene una fecha prefijada de finalización: el día siguiente.
2. Tiene fijado el objetivo, la incertidumbre esta en cuantos días o semanas tardará en alcanzarlo.
3. No tiene en vista una finalización del conflicto.

Respecto al conocimiento de las posibles consecuencias:

1. Conoce las incertidumbres: quien va a ganar la batalla (él o el enemigo), las cuestiones claves vinculadas a ganar o perder (número de efectivos, qué tropas movilizar primero, cuántas descargas de artillería realizar, sobre qué unidades adversarias, en qué condiciones, etc.).
2. Puede llegar a conocer casi todos los factores relevantes que afectan el cumplimiento del objetivo pero son demasiados como para listarlos; además, muchos de ellos ni siquiera terminarán importando.
3. No puede siquiera identificar todos los posibles actores y eventos que pueden afectar el conflicto que enfrenta. Porque además, en la evolución del conflicto, los actores interactúan y forman nuevas entidades³⁴, que eran simplemente imposibles de predecir por anticipado.

L

³⁴ Por ejemplo, el desembarco de las *Rapid Deployment Forces*.

De acuerdo a lo anterior, los escenarios se clasifican de la forma siguiente:

- El horizonte 1 es cierto. El actor conoce lo que puede llegar a pasar y como sus dotaciones iniciales y sus acciones afectarán el devenir de los posibles resultados.
- El horizonte 2 es complicado. El actor conoce la clase de sucesos que pueden afectar su misión, pero dada la alta combinación de casos teniendo en cuenta la geografía, las condiciones meteorológicas, los problemas de abastecimiento, los conflictos internos de la tropa, etc. es difícil puntualizar en todas ellas o en sus combinaciones. No obstante, el agente cree que puede responder eficazmente a las posibles eventualidades.
- El horizonte 3 es complejo. El contexto se deforma (modifica) en respuesta a las acciones del resto y nuevos sucesos (no previamente posibles) emergen. Para entender hacia donde va (y de donde viene) el sistema, tiene que generar un nuevo lenguaje para describir tales sucesos, y asimismo reinterpretar hechos que pensaba fijos pero que su carácter se ha modificado en vistas de los nuevos elementos emergentes. Su destino esta siempre mas allá de su horizonte de pronostico, la relación entre lo que hace y hacia donde esta yendo es siempre tenue y por lo tanto ambigua. Habitando en un mundo de emergencia, novedad continua y ambigüedad, el horizonte es clasificado como complejo (Maxfield y Lane, 1995).

De acuerdo a la visión tradicional, podría afirmarse que el primer horizonte se desarrolla bajo condiciones de certeza, el segundo bajo condiciones de riesgo y el tercero bajo condiciones de incertidumbre. No obstante, como fue dicho, los tres escenarios contemplan algún grado de incertidumbre, y en ningún momento se supuso, por ejemplo, el conocimiento de las probabilidades de los factores intervinientes en el segundo escenario. En tanto, en el caso del tercer escenario, se especifica la existencia de dinámicas emergentes, convirtiéndolo en complejo.

Sin embargo, en muchos casos la clasificación termina dependiendo del enfoque abordado para su análisis. En esta instancia vale recordar el cuadro (tabla 1) presentado en la primera sección de este trabajo, donde se resume los principales paradigmas matemáticos.

Tabla N° 14 (ídem Tabla N°1)

PARADIGMAS MATEMÁTICOS
<p>ECUACIONES DIFERENCIALES: Sirvieron para modelizar sistemas simples y determinar el futuro del sistema</p>
<p>ESTADÍSTICA: Sirvió para estudiar fenómenos con mayor cantidad de variables intervinientes, persiguiendo mejorar la precisión de las estimaciones en sistemas con cierta regularidad.</p>
<p>CAOS EN DESARROLLO: Surge dada la imposibilidad de aplicar el paradigma estadístico en comportamientos caóticos.</p>

Fuente: Elaboración propia

El primer paradigma constituyen las herramientas a ser aplicadas bajo condiciones de certeza (horizonte 1), el segundo bajo condiciones de riesgo (horizonte 2) y el tercero bajo condiciones de complejidad-incertidumbre (horizonte 3).

En síntesis, los horizontes 1 y 2 son los habitualmente conocidos, con los matices antes mencionados. No obstante, el caso 3 resulta un tanto difuso. Por ello, en este trabajo se adscribe a la propuesta de Lane y Maxfield (1995) antes desarrollada. Esto implica que, como fue dicho, no cualquier contexto de incertidumbre puede ser catalogado como complejo. Deben darse algunas de las características mencionadas, como por ejemplo emergencia, novedad continua y ambigüedad, de acuerdo a la definición de los autores mencionados.

Es decir, en este estudio, el contexto de complejidad-incertidumbre no se reduce solamente al no conocimiento de las posibilidades de ocurrencia del fenómeno, sino sobre todo al desarrollo de las dinámicas propias de la dinámica compleja, tales como la dinámica emergente, la inestabilidad, el cambio continuo, la falta de regularidad, la disolución de estructuras, la sensibilidad a las condiciones iniciales, etc. (asemejables, por ejemplo, a un proceso caótico).

5.1.2. Acciones bajo escenarios complejos

Ahora bien, un aspecto importante es preguntarse cómo actuar o qué acciones desarrollar bajo la hipótesis de estar actuando dentro de un escenario de complejidad. Respecto a esto, Lane y Maxfield (1995) desarrollan todo un conjunto de implicancias para desarrollar acciones bajo escenarios complejos. Las mismas se resumen a continuación:

- Implicancia 1: Identificar verdaderamente que se está frente a un escenario complejo. Fallar en la detección de cambios en la estructura del sistema o bien interpretar una nueva estructura a través de los lentes de viejas lecturas, lo cual es un camino seguro al fracaso.
- Implicancia 2: El solo hecho de diagnosticar la existencia de inestabilidad estructural no es suficiente, es también necesario reconocer que el camino a través del cual pueda llegar alcanzarse algún sendero de equilibrio no es predecible. No es una buena estrategia el formular y apegarse a la planificación de un escenario donde se hipotetice la forma en la cual se expresará una situación compleja.
- Implicancia 3: Los agentes deben abocarse a la tarea de interrogar en forma continua a sus propias interpretaciones, a otros agentes y artefactos que rodean su actividad. Deben desarrollar prácticas que eviten la simple pero costosa tendencia de tomar a las interpretaciones como hechos.
- Implicancia 4: Los agentes deben monitorear sus relaciones para determinar su potencial de generatividad, y deben orientar recursos para reforzar el potencial generativo de las relaciones clave. Incentivar relaciones generativas es especialmente importante cuando los horizontes son complejos.

Respecto a esto último, los autores reposan en dos pilares a la concepción de la estrategia bajo un escenario complejo: (i) poblar el escenario y (ii) potenciar los *feedbacks* positivos³⁵. El pilar (i) se refiere a la implementación de prácticas interpretativas, tema que se adscribe como clave en este trabajo, y será desarrollado en sección 5.2. El pilar (ii) se vincula a cómo aprovechar un contexto complejo, explotando las no linealidades (nuevas oportunidades) que se van creando frente a un escenario de cambio continuo, las cuales solo persistirán durante cierto (o mas bien,

³⁵ La traducción es propia. Los autores hablan de "populating the world" and "fostering generative relationships".

incierto) período de tiempo. Tales situaciones son denominadas "vinculaciones o relaciones generativas", las cuales podrán producir *feedbacks* positivos bajo cierto contexto, pero no en otros. En este sentido cabe, a modo metafórico, citar a Bertotto (2002): "Además de un ámbito estratégico, en todo escenario se deberán considerar o determinar los sistemas de alianzas, los cuales pendularán entre la cooperación y la competencia. Es decir, una relación generativa puede invertirse y producir retroalimentación negativa si el contexto cambió.

En suma, para arrojar luz sobre un escenario complejo es necesario dejar de lado el proceso algorítmico para dar lugar al pensamiento estratégico. Este tema se sintetiza a continuación.

5.2. La gestión de la complejidad como estrategia

El proceso estratégico es reflexión-en-la-acción (Levy, 2007)

Una vez diagnosticado un escenario complejo, se entiende que la gestión del mismo (léase gestión de la incertidumbre del sistema) se encuadra como una actividad estratégica. Vale recordar que la principal fuente de riesgo en un sistema complejo son las posibles dinámicas emergentes que el mismo puede generar.

De acuerdo a Levy (2007), la decisión estratégica se adopta en un marco que no permite determinar la totalidad de las variables que intervienen, sus valores e interrelaciones y, por lo tanto, resulta imposible comprender y establecer cuál es el emergente sistémico.

Por ello, en la línea de Lane y Maxfield, la labor interpretativa juega un papel fundamental. En este sentido, cobran trascendencia los modelos mentales³⁶ de los agentes que encaran la labor interpretativa. En la gestión de un modelo complejo, la capacidad de interpretación es esencial, dado que la impredecibilidad requiere reinterpretación continua (Lane y Maxfield, 1995).

L

³⁶ De acuerdo a Levy (2007) "los modelos mentales son representaciones de una situación real o imaginaria que construye el individuo. De este modo, las personas traducen los hechos externos en modelos internos y razonan manipulando esas representaciones simbólicas. Los modelos mentales constituyen básicamente una simulación del mundo, construida a partir de la percepción, la comprensión de un discurso o la imaginación. El modelo mental es la representación del contenido referencial".

En este sentido, Levy (2007) resume que "el proceso de estrategización requiere anticipar y responder a un entorno de complejidad creciente, lo que torna mas imperiosa la necesidad de contar con la habilidad de prever los cambios a partir de la comprensión de su dinámica. Sin embargo, dado que la interacción entre los sistemas sociotécnicos complejos y sus entornos se desarrolla como un juego del que no se pueden conocer las reglas, construir una estrategia significa hipotetizarlas y experimentar su viabilidad a través de la ejecución".

En este sentido, una forma de "*populating the world*" es a través de la imaginación de una estructura y elementos intervinientes, y la observación ulterior de las posibles dinámicas emergentes en el marco de una simulación.

Esto parecería estar en línea del verdadero sentido de la creación de una estrategia, entendiendo a la misma como un proceso cognitivo, fruto de la arquitectura mental del *policy maker*, cuya fuente no es necesariamente la cuantificación y el cálculo de probabilidades. En palabras de Levy, "la estadística es el peor enemigo de la estrategia".

Por ello, ante la falta de conocimiento, una respuesta es la interpretación cognitiva. Imaginar un modelo, el cual, como fue desarrollado en este trabajo, no tiene un resultado a priori, sino que da cuenta de resultados inesperados (dinámica emergente) fruto de la interacción.

En este sentido, los modelos de agentes pueden abarcar como mínimo los niveles tácticos y operacionales, dejando la visión analítica (en el caso planteado, la dinámica caótica-compleja) como la representación estratégica. Es decir, una de las propuestas de este trabajo se vincula a la selección de los modelos analíticos como estrategia y en la generación de estructuras complejas a partir de modelos de agente en el plano operacional.

Si bien esto parecería un ejercicio trivial, en realidad no lo es. No lo es porque en general los actores involucrados en el proceso de decisión tienden a favorecer los "hechos" en detrimento de su interpretación cognitiva. El problema fundamental radicaría en la estructura mental, donde no se aprende en base a reglas sino a hechos, siendo una incapacidad la elaboración de metarreglas³⁷ (Taleb, 2007).

El ser humano tiende a clasificar y categorizar, como una suerte de autodefensa frente a la falta de comprensión acerca de un fenómeno. Esto puede ser útil en sistemas simples, o sistemas reducibles (García, 2002). No obstante, el hecho de categorizar siempre produce una reducción de la auténtica complejidad (Taleb, 2007). En sistemas

³⁷ "Desdeñamos lo abstracto; lo despreciamos con pasión" (Taleb, 2007).

complejos, la reducibilidad lleva a descartar el componente de incertidumbre, llevando a una mala interpretación de la estructura del sistema y, por lo tanto, a una visión errónea del fenómeno (que en el caso del mercado financiero tiende a subestimar el evento extremo).

Vale destacar que los procedimientos tradicionales de gestión del riesgo no parten de un diagnóstico acerca de las condiciones del mercado, aplicando las herramientas relativas al paradigma estadístico en forma directa. En la jerga introducida, ese error de diagnóstico juega un papel trascendental y anula de antemano la interpretación del riesgo emergente.

Ahora bien, una vez diagnosticado un horizonte complejo, ello no implica la incapacidad de acción. El entendimiento de las lógicas que gobiernan un sistema complejo puede dar muchas respuestas.

En este sentido Miller y Page (2007) sostienen que la carencia de equilibrio no implica imposibilidad de predicción, dado que aplicando técnicas de los sistemas sociales adaptativos es posible explorar aquellos sistemas que se sitúan entre el equilibrio y el caos.

Una de las técnicas es justamente la búsqueda del límite del caos ("*the edge of chaos*"). La idea es que si perturbamos levemente una regla que genera complejidad se obtendrá una regla que genera o caos o estabilidad. Ergo, la búsqueda del límite del caos se focaliza en pequeños cambios en una regla que generan grandes impactos en su comportamiento.

Desde la perspectiva generativista, debe tenerse presente que son las fuerzas inherentes al sistema las que definen su grado de predictibilidad. En el caso del mercado financiero, los agentes están incentivados a encontrar y explotar cualquier tipo de regularidad. Esta acción resulta en una "destrucción" de dicha regularidad, y un incremento del nivel de complejidad. En contraposición, en otros sistemas la regularidad puede ser generada en lugar de destruida. Esto se da en casos donde la participación incremental de agentes y su heterogeneidad introducen desórdenes que no son deseables, y por lo tanto se busca reorganizar el sistema, por ejemplo, segmentándolo en diferentes procesos independientes.

Lejos de cumplirse la ley de los grandes números, donde las "heterogeneidades" se cancelan unas con otras, los sistemas que ostentan *feedback* positivo u otro tipo de interconexión entre agentes tienden a generar comportamientos emergentes dado no

por el promedio sino por el conjunto de valores extremos (*"the tail wags the dog"*³⁸). Por ejemplo, en una corrida, no es tan importante el nivel de tolerancia promedio sino el umbral mínimo de unos pocos agentes (los que inician la corrida).

Esto hace que el análisis no se focalice en medias y varianzas sino en límites y umbrales a partir de los cuales pueden desencadenarse efectos emergentes. En este sentido, la introducción de pequeña dosis de heterogeneidad en un sistema homogéneo puede generar cambios radicales en el comportamiento agregado. En tanto, la adición de heterogeneidad creciente puede hacer regresar al sistema a un estado de orden.

Por otro lado, también se ha mostrado que pequeñas perturbaciones aleatorias pueden generar dinámica emergente en sistemas con una arquitectura interna muy simple, dependiendo de la configuración de los parámetros del mismo y no de la magnitud del *shock* exógeno.

Esto implica que en muchas ocasiones pequeños cambios puedan reducir drásticamente la complejidad del sistema. Estos cambios pueden darse como perturbaciones a las variables o a los parámetros del sistema, siendo esta última opción la más efectiva de acuerdo a los modelos teóricos seleccionados en este trabajo.

Lo anterior implica sacarle provecho a un contexto complejo, bajo la hipótesis de que pequeñas inducciones de energía pueden generar grandes cambios en la evolución del sistema.

En el marco de la gestión de escenarios emergentes, esto implica asumir una posición activa en el desempeño del sistema, teniendo presente la capacidad de influir sobre la trayectoria del mismo aún como agente individual (*the tail wags the dog*), tanto a través de la celebración de relaciones generativas como en la generación de señales que pueden influir al entorno. En otras palabras, reconocer el carácter autorreferencial de los sistemas económicos, lo cual cobra trascendencia central en los sistemas complejos adaptativos.

³⁸ "La cola mueve al perro": la metáfora aduce a la importancia de los extremos en detrimento de los valores medios en ciertos sistemas.

6. SÍNTESIS Y CONCLUSIONES

6.1. Síntesis

En la primera parte de este trabajo se propuso una definición de dinámica y sistema complejo. Se puso énfasis en la literatura vinculada a los sistemas sociales adaptativos. Se mostró que una herramienta para modelizar, de acuerdo a la perspectiva compleja, son los modelos de agente (ABM), los cuales se construyen sobre bases generativas. Se resumieron un conjunto de modelos que presentan distintas características, pero cuyo denominador común fue la generación de dinámica emergente.

Este concepto es una característica fundamental de los modelos complejos y en el trabajo se la interpreta como una de las mayores fuentes de riesgo de un sistema.

Se realizó un relevamiento empírico de los mercados de capitales durante la última década, mostrando la imposibilidad de predicción de los modelos estadísticos tradicionales en sistemas que pueden generar dinámica emergente. Se propuso la alternativa de estimar el riesgo en base a modelos de agentes en interacción que permitan emular casos extremos, a los fines de incorporarlos a las estimaciones.

En segundo lugar se hizo un análisis descriptivo de las economías latinoamericanas en el contexto de la crisis internacional del 2008/2009, proponiendo la aplicación de la dinámica compleja como meta-modelo para interpretar la dinámica transicional (estable e inestable) de las economías del bloque. Se hizo referencia a la evidencia de amplificación de *shocks*. Se propuso la visión emergentista (diagnosticable) como eje principal para la cualificación del riesgo en economías latinoamericanas.

Por último, se propuso la aplicación de un meta modelo de análisis en el marco del pensamiento estratégico, y la instrumentación de modelos de agente como complemento para la proyección de escenarios en el marco del *stress testing*.

6.2. Conclusiones

Se ha verificado sobre bases empíricas que los métodos estadísticos tradicionales tienen fallas estructurales para incorporar, en las valuaciones de riesgos, a los contextos de crisis. Dentro de esta falla, encuentra espacio la perspectiva del análisis complejo, el cual advierte, en base a la estructura del mercado y las percepciones de los agentes que lo conforman, la posibilidad de generación de dinámicas emergentes

que pueden poner en jaque el valor de los activos. Esto implica valorar riesgos implícitos del sistema, los cuales no emiten "señales" en períodos normales, pero que se expresan en forma concatenada ante escenarios de desconfianza o incertidumbre, generando o potenciando procesos de crisis sistémicas.

Entre las lógicas que gobiernan a los sistemas complejos, en la interpretación dada en este trabajo, se ha puesto especial énfasis en la microfundamentación de agentes heterogéneos en interacción. Dentro de este marco, cobran relevancia los procesos de *feedback* positivo, la memoria de largo plazo y la sobre-reacción. El *feedback* positivo está vinculado en la actuación en tendencia, replicando el comportamiento del resto. La memoria de largo plazo se vincula a la repetición de hechos memorables, sucesos drásticos (crisis pasadas) que quedan impresos en la memoria de los agentes y hacen eco en períodos donde se cree que pueden volver a repetirse. Por último, la sobre-reacción (o sub-reacción) se vincula a la respuesta de los agentes frente a *shocks* exógenos. El *feedback* positivo y la memoria conllevan a que en ciertos contextos los agentes sobre-reaccionen ante impulsos mínimos, motivados por la acción del resto (*feedback*) o por su sistema de creencias (memoria). La existencia de sobre-reacción es lo que abriría un paso fundamental a la existencia de dinámica caótica en ciertos contextos.

Respecto a esto último, se contextualiza la posibilidad de existencia de dinámica caótica exclusivamente en contextos de crisis, interpretada como reacciones de los agentes totalmente desvinculadas de los *fundamentals*, pero motivadas por el sistema de creencias e influencias del sistema al cual están vinculados. El desconocimiento, el miedo y el fenómeno de amplificación social pueden explicar reacciones imprevistas y de tipo defensivo que terminan presionando sobre los *fundamentals* y profundizado o generando la crisis. Este tipo de reacciones se expresan generalmente sobre decisiones de compra/venta de activos, divisas y extracciones de depósitos. Queda como hipótesis derivada el análisis de decisiones de consumo e inversión.

El primer relevamiento empírico se limitó a mostrar que las bases estadísticas resultarían insuficientes para incorporar estimaciones de riesgos sistémicos generados por la interacción de agentes heterogéneos adaptativos. Por lo tanto una propuesta de análisis complementaria es la aplicación del enfoque generativo.

El segundo relevamiento consistió en mostrar ciertas falencias estructurales de las economías del bloque latinoamericano que justifican la hipótesis de amplificación de *shocks*. El punto fundamental radica en que, tradicionalmente, las economías latinoamericanas tenderían a ser "amplificadoras" de los *shocks* exógenos, dadas ciertas características que generan una alta volatilidad endógena subyacente, la cual

emerge ante perturbaciones externas. En este sentido, el *shock* puede empeorar dadas las condiciones iniciales del conjunto de la economía. Si bien el bloque pareció aislado de la crisis *subprime* en momentos iniciales, posteriormente comenzó a propagarse un efecto de amplificación de las perturbaciones dados los puntos clave desarrollados en el cuerpo del trabajo, como por ejemplo:

- Amplificación del *shock* comercial a través de la sensibilidad de la estructura tributaria respecto al sector externo
- Menor efectividad de la política fiscal:
 - dada la falta de estabilizadores automáticos
 - disminución del efecto multiplicador por desconfianza acerca de la discrecionalidad y financiamiento de los planes (posibilidad de multiplicadores negativos)

En el caso Argentino, deben sumarse otros factores adicionales vinculados al recuerdo latente de hechos memorables (grandes crisis pasadas y recientes) que quiebran la confianza en forma instantánea en instituciones económicas fundamentales (moneda local, sistema bancario), dando mayores canales de transmisión al proceso de amplificación de *shocks*.

Dentro de este marco cobra crucial relevancia como análisis complementario del riesgo el diagnóstico macro-fiscal, dado que, al menos en el caso de Argentina, el riesgo macroeconómico fagocita el riesgo de mercado, en el sentido que las fallas estructurales de la macro son las que terminan generando mayores constricciones a la actividad productiva que los riesgos específicos de cada negocio. En tanto, se enfatiza en el vocablo marco-fiscal, habida cuenta que los problemas de la macro son generalmente causa de falencias estructurales en el financiamiento de largo plazo de sector público. El diagnóstico de la ecuación fiscal del estado es un paso fundamental para el análisis del riesgo desde la perspectiva evolutiva en el caso estudiado.

En suma, el eje común que cruza ambos relevamientos empíricos es la interpretación del riesgo a través del concepto de emergencia. Esto está vinculado a algún tipo de proceso de propagación y amplificación de señales que, en el límite, puede asociarse a la idea de caos. Pero debe quedar en claro que no toda amplificación necesariamente significa dinámica caótica.

En síntesis, en vista de la evidencia empírica relevada, se adscribe que el análisis de los mercados de capitales en general y en particular a los países latinoamericanos (vinculados a la estructura macroeconómica) debería ser enfocado desde la óptica del tercer paradigma matemático, es decir, el "caos en desarrollo". Dentro de este marco, cobra protagonismo el riesgo emergente, en detrimento de los riesgos normales (gaussianos o no gaussianos) del mercado. Una visión analítica propuesta como

modelo mental al nivel de la interpretación estratégica es la dinámica caótica en general y la dinámica de amplificación de *shocks* en particular.

En el plano operacional, se propone la aplicación de los ABM, principalmente para su uso prospectivo (construcción de escenarios futuros mediante simulaciones) a los fines de evaluar en base a la estructura de mercado propuesta, el número de casos de generación de dinámica emergente, dando mayores herramientas a lo que hace a la cuantificación del riesgo bajo este paradigma.

En el marco de un modelo tradicional de gestión del riesgo, los ABM encuentran su ubicuidad en el *stress testing*, permitiendo incorporar la correlación no lineal entre variables a través de la generación de dinámica emergente no predecible a priori. Es decir, incorpora el ejercicio de laboratorio a la gestión del riesgo, creando escenarios hipotéticos no reproducibles a priori, sino generados por la propia dinámica del sistema emulado.

En este sentido, uno de los mayores desafíos en las técnicas del *stress testing* es la habilidad de predecir el peor escenario, lo cual refuerza la necesidad de vincular los fundamentos macro con los mecanismos de propagación (Loser *et al*, 2010). En esta línea de razonamiento, la aplicación del marco propuesto está vinculado justamente a la proyección de caso extremo o "peor escenario". En el caso de Latinoamérica esto se da mediante los dos factores tratados en este trabajo: la vulnerabilidad de la estructura macroeconómica por un lado y la sobre-reacción de los agentes por otro. Vale destacar que resulta muy difícil modelar movimientos emergentes si no se incorporan reglas de comportamiento de los agentes. Esto permite analizar un escenario donde las variables se mueven en forma simultánea, a diferencia del esquema tradicional donde son analizadas en forma independiente.

Por último, adscribir a la dinámica compleja (y caótica) como meta-modelo de análisis, implica dar un paso adelante en la construcción de una teoría de la crisis, principal vacío en el *mainstream* económico actual.

7. BIBLIOGRAFÍA

Anderson, P.; Arrow, K.; Pines, D. (Eds.) (1988), *The Economy as an Evolving Complex System I*. Westview Press, Boulder.

Arthur, W.; Darlauf, S.; Lane, D. (Eds.) (1997), *The Economy as an Evolving Complex System II*. Addison Westview Press, Boulder.

Arthur, W.; Darlauf, S.; Lane, D. (Eds.) (2003), *The Economy as an Evolving Complex System III*. Oxford University Press, New York.

Barkley Rosser, J. (2000). *From Catastrophe to Chaos: A General Theory of Economic Discontinuities: Mathematics, Microeconomics, Macroeconomics, and Finance*. Springer Verlag, Berlin.

Barnett, W.; Medio, A.; Serletis, A. (1997). "Nonlinear and Complex Dynamics In Economics". *Econometrics*. Vol. N° 9709001, pp. 1-88.

Battran, A. (2001). *Navegar la Complejidad*. Granica, Madrid.

Brealey, R.A; Myers, S. C. (1998). *Fundamentos de Financiación Empresarial*. 4ta edición, Mc Graw Hill. New York.

Casparri, M. T. (2004). "La Teoría de los Valores Extremos. Sus implicancias en épocas de crisis". *Anales de las XI Jornadas Actuariales*.

Casparri, M. T. (2008). *Impactos de la crisis financiera internacional en Argentina*. 1a edición. Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires.

CEPAL (2009). "La Reacción de los Gobiernos de las Américas Frente a la Crisis Internacional: Una Presentación Sintética de las Medidas Anunciadas hasta el 31 de Mayo de 2009". Santiago de Chile.

Céspedes, L.; Goldfajn, I.; Valdés, R. (2005). *Policy Responses to External Shocks: The experiences of Australia, Brazil and Chile*. Central Bank of Chile Working Papers N° 321. Santiago de Chile.

Cetrángolo, O.; Jiménez, J. (2003). "Política Fiscal en Argentina durante el Régimen de Convertibilidad". *Revista CEPAL*. Vol. N° 35, pp. 13-20.

Cetrángolo, O.; Jiménez, J. (2004). "Las relaciones entre niveles de gobierno en Argentina. raíces históricas, instituciones y conflictos persistentes". *Revista CEPAL*. Vol. N° 47, pp. 59-82.

- Damodaran, A. (2001). *Corporate finance*. 2da edición. John Wiley & Sons, Hoboken.
- Day, R. H. (1982). "Irregular Growth Cycles". *American Economic Review*. Vol. 72, pp. 406-14.
- Day, R. H. (1994). *Complex Economic Dynamics, Volume I: An Introduction to Dynamical Systems and Market Mechanisms*. MIT Press, Cambridge.
- De Bond, W. F. M.; Thaler, R. (1993). "Does the Stock Market Overreact?", en *Advances in Behavioral Finance*, Thaler, R. (ed.). Russell Sage Foundation, New York, pp. 249-264.
- De Mello, L.; Moccerro, D. (2006). *Brazil's Fiscal Stance during 1995-2005: The Effect of Indebtedness on Fiscal Policy over the Business Cycle*. OCDE Working Paper N° 485. Paris.
- De Mello, L.; Moccerro, D. (2010). "Monetary Policy and Macroeconomic Stabilisation in Latin America: The Cases of Brazil, Chile, Colombia and Mexico". *Journal of International Money and Finance*. Vol. 30, pp. 229-45.
- Devaney, R. L. (1989). *An introduction to Chaotic Dynamical Systems*. 2nd edition. Addison-Wesley, Reading City.
- Elton, E.J; Gruber, M.J. (1995). *Modern Portfolio Theory and Investment Analysis*. 5ta edición. John Wiley & Sons, Hoboken.
- Espen, G. H. (2006). *Option Pricing Formulas*. McGraw-Hill, New York.
- Etkin, J. (2005). *Gestión de la complejidad en las organizaciones*. Granica, Buenos Aires.
- Fama, E. F. (1965). "The Behavior of Stock-Market Prices". *The Journal of Business*. Vol. N° 38, N° 1, pp. 34-105.
- Fanelli, J. (2009). *La política económica fuera del corredor. Reflexiones sobre la crisis global y la experiencia latinoamericana*. Ensayos Económicos 53/54: 73-105. Banco Central de la República Argentina, Ciudad Autónoma de Buenos Aires.
- Fanelli, J. M. (2008). *Macroeconomic Volatility, Institutions and Financial Architectures. The Developing World Experience*. Palgrave Macmillan, Nueva York.
- Feigenbaum, M. J. (1978). "Quantitative Universality for a Class of Non-Linear Transformations". *Journal of Statistical Physics*. Vol. 19, pp. 25-52.
- Fernández Arias, E.; Montiel, P. (2009). *Crisis Response in Latin America: is The "Rainy Day" at Hand?* Working Paper #686, RG-K1089. BID, Washington.
- Fernández Díaz, A. (2002). *Dinámica Caótica en Economía*. Mc Graw Hill, Madrid.

- Garnica Hervás, J.; Thomasz, E. O. (2009). *Impactos de la Crisis Financiera Internacional en la Argentina*. Volumen 2. Universidad de Buenos Aires, Ciudad Autónoma de Buenos Aires.
- Gómez, R. (1995). *Neoliberalismo y seudociencia*. Lugar Editorial, Buenos Aires.
- Gómez, R. (2004/5). "Las ciencias hoy: una reflexión desde su filosofía". En Palchevich, M.; Martínez, L. (comp.). *Pensar la ciencia II*. Boletín de la BCN N° 122, pp.117-154.
- Heymann, D. (2007), "Macroeconomía de las promesas rotas", *Revista de economía política de Buenos Aires*. Año 1, Vol. 2, pp. 27-53.
- Heymann, D. (2007). *Progresos en macroeconomía*. 1a edición. Temas Grupo Editorial, Ciudad Autónoma de Buenos Aires.
- Hull, J. (2010). *Risk Management and Financial Institutions*. Second Edition. Pearson, New York.
- Hull, J. (1996). *Options, Futures and other Derivates*. Third Edition. Prentice Hall, New York.
- Jiménez, J. P.; Fanelli, J. M. (2009). *Crisis, Volatilidad, Ciclo y Política Fiscal en América Latina*. CEPAL IC/L.3038, Santiago de Chile.
- Jorion, P. (2007). *Financial Risk Manager Handbook*. Fourth Edition. Wiley & Sons. Inc., New York.
- Kahneman, D.; Slovic, P.; Tversky, A. (1982). *Judgment Under Uncertainty: Heuristics and Biases*. Cambridge University Press, New York.
- Karino, Y.; Kawagoe, T. (2009). "Bubble and Crash in the Artificial Financial Market", en *Lecture notes in economics and mathematical systems*. Vol N° 631, *Artificial Economics: The generative method in economics*. Hernández, C.; Posada, M.; López-Paredes, A. (Editors). Springer, Berlin.
- Kiguel, M.; Loser, C.; Mermelstein, D. (2010), "A Macroprudential Framework for the Early Detection of Banking Problems in Emerging Economies". *Working Paper Series on Regional Economic Integration*, Vol N° 44.
- Kirman, A. (2011). *Complex Economics: Individual and collective rationality. The Graz Schumpeter Lectures*. Routledge, New York.
- Lakatos, I. (1976). *Proofs and Refutations*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Lamothe, P. (1993). *Opciones financieras: un enfoque fundamental*. Mc Graw Hill, New York.
- Laplace, P. S. (1886). *Œuvres complètes de Laplace: Théorie analytique des probabilités*. 3rd Edition. Nabu Press, Paris.
- Leijonhufvud, A. (1993). "Toward a not-too-rational macroeconomics", en *Beyond Microfoundations: Post Walrasian Macroeconomics*. Cambridge University Press, Cambridge.

- Li, T. Y.; Yorke, J. A. (1975). "Period three implies chaos". *American Mathematical Monthly*. Vol N° 82, pp. 985–992.
- Lux, T. (1998). "The socio-economic dynamics of speculative markets: interacting agents, chaos, and the fat tails of return distributions". *Journal of Economic Behavior & Organization*. Vol. N° 33, pp. 43–165.
- Mandelbrot, B. (1997). *Fractals and Scaling in Finance*. Springer Verlag, New York.
- Mandelbrot, B. (2004). *The (Mis) Behavior of Markets*. Basic Books, London.
- Maneville, P. (2004). *Instabilities, Chaos and Turbulence*. Imperial College Press, London.
- Masters, M. W. (2008). *Testimony before de Committee on Homeland Security and Governmental Affairs*. United States Senate Report, Washington.
- May, R. M. (1976). "Simple mathematical models with very complicated dynamics". *Nature*. Vol. N° 261 (5560), pp. 459–467.
- Miller, J.; Page, S. (2007). *Complex Adaptive Systems. An introduction to computational models of social life*. Princeton University Press, Oxford.
- Mindlin, G. (2008). *Causas y Azares*. Siglo XXI, Buenos Aires.
- Morin, E. (1997). *Introducción al Pensamiento Complejo*. Gedisa, Barcelona.
- Morin, E. (2007). *Introducción al pensamiento complejo*. Gedisa, Barcelona.
- Ocampo, J. A. (2009). "Impactos de la Crisis Financiera Mundial sobre América Latina". *Revista CEPAL*. Vol. N° 97, pp. 9–32.
- Peters, E. (1996). *Chaos and Order in Capital Markets*. Wiley & Sons. Inc., New York.
- Pliska, S. (1994). *Introduction to Mathematical Finance: Discrete time models*. Wiley & Sons. Inc., New York.
- Prigogine, Y.; Stengers, I. (1979). *La Nueva Alianza: Metamorfosis de la Ciencia*. Alianza, Buenos Aires.
- Prokhorov, A. (2008). "Nonlinear dynamics and chaos theory in economics: a historical perspective". *Quantile*. Vol. N° 4, pp. 79–92.
- Pryor, F. L. (1995). *Economic Evolution and Structure: The Impact of Complexity on the U.S. Economic System*. Cambridge University Press, New York.

- Ruelle, D. (1979). "Sensitive Dependence on Initial Condition and Turbulent Behavior of Dynamical Systems", en *Bifurcation Theory and Applications to Scientific Disciplines*, Grel, O.; Rossler, O. E. (eds.). New York Academy of Sciences, New York, pp. 408-446.
- Samentband, M. J. (1994). *Entre el orden y el caos: la complejidad*. Fondo de Cultura Económica. Buenos Aires.
- Samuelson, L. (2006). "Perspectives on the Economy as an Evolving Complex System", en *The Economy as an Evolving Complex System III*. Vol. N° 3, pp. 243-266.
- Sanya S.; Montfort; M. (2009). *Post-crisis bank Behavior: lessons from Mercosur*. Fondo Monetario Internacional.
- Schuschny, A. (2001). *Auto-organización en Sistemas Económicos*. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Económicas, Universidad de Buenos Aires.
- Serra, R.; Iriarte, J.; Le Fosee, G. (2002). *El Nuevo Juego de los Negocios*. Norma, Buenos Aires.
- Soros, G. (2009). *The New Paradigm for Financial Markets: The Credit Crisis of 2008 and What It Means*. First Edition. PublicAffairs, Jackson.
- Stodder, J. P. (1995). "The Evolution of Complexity in Primitive Economies: Theory". *Journal of Comparative Economics*. Vol. N° 20, pp. 1-21.
- Taleb, N. (2007). *The Black Swan: Over the impact of the highly improbable*. Random House, New York.
- Turner, A.; Haldane, A.; Woolley, P.; Wadhvani, S.; Godhart, C.; Smithers, A.; Large, A.; Kay, J.; Wolf, M.; Boone, P.; Johnson, S.; Layard, R. (2010). *The Future of Finance: The LSE Report*. London School of Economics and Political Science, London.
- Ulrich B. (2004). *¿Que es la Globalización?* Paidós, Barcelona.
- Vengas Martínez, F. (2007). *Riesgos Financieros y Económicos*. Thompson, New York.
- Vialar, T. (2009). *Complex and Chaotic Nonlinear Dynamics: Advances in Economics and Finance. Mathematics and Statistics*. Springer Verlag, Berlin.
- Vogel, H. (2010). *Financial Market Bubbles and Crashes*. Cambridge University Press, Cambridge.
- White, W. (2009). *Should monetary policy lean or clean?* Working paper N° 34. Federal Reserve Bank of Dallas, Globalization and Monetary Policy Institute, Dallas.

Yehoue, E. (2009). *Emerging Economy Responses to the Global Financial Crisis of 2007-09: An Empirical Analysis of the Liquidity Easing Measures*. FMI Working Paper Monetary and Capital Markets Department. Authorized for distribution by Karl F. Habermeier, Washington.

Yorke, J. A.; Allgood, K. T. (1983). "Cascades of Period Doubling Bifurcations: A Prerequisite for Horseshoes". *Bulletin of the American Mathematical Society*. Vol. N° 9, pp. 319-322.

8. ANEXOS

8.1. Anexo 1: Dinámica Caótica

En su nacimiento, la teoría del caos se vinculaba al estudio de flujos turbulentos. Por ello, se comenzará definiendo el concepto de flujo. Luego se clasificarán distintos tipos de comportamientos de las trayectorias de sistemas para culminar con el resumen del estudio de Lorenz (1969).

8.1.1. Flujos

Un flujo es un sistema dinámico expresado en tiempo continuo. La evolución de la regla f' constituye una familia de mapeos de $M \rightarrow M$ parametrizados por t perteneciente a los reales. Dado que t representa un intervalo de tiempo, cualquier familia de mapeos que forme una regla evolutiva debe cumplir las siguientes condiciones:

(a) $f^0(x) = x$

(b) $f'(f'(x)) = f'^{t+\tau}(x)$

(c) el mapeo $(x, t) \rightarrow f^t(x)$ desde $M \times \mathbb{R}$ en M es continuo

Para tiempos infinitesimales, los flujos pueden ser definidos mediante ecuaciones diferenciales:

$$x(t + \tau) = f'^{t+\tau}(x_0) = f(\tau, f(t, x_0))$$

Se calcula la derivada respecto a τ :

$$\left. \frac{dx}{d\tau} \right|_{\tau=0} = \left. \frac{\partial f}{\partial \tau}(\tau, f(t, x_0)) \right|_{\tau=0} = \frac{\partial}{\partial t} f^0(x(t))$$

Se define $\dot{x}(t)$ como la derivada respecto al tiempo de la trayectoria en el punto $x(t)$, la cual puede ser expresada como la derivada temporal de la regla evolutiva, es decir, como un vector evaluado en el mismo punto. Considerando todas las posibles

trayectorias, se obtiene un vector $\partial_t f^0(x)$ en cualquier punto $x \in M$, definiendo un campo vectorial

$$v(x) = \frac{\partial f^0}{\partial t}(x)$$

En cada punto del espacio de fases existe un vector que proporciona la dirección en la cual evoluciona una órbita.

Flujo con un atractor extraño

Un ejemplo de flujo autónomo es el sistema de Rosser:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -y - z \\ \dot{y} &= x + ay \\ \dot{z} &= b + z(x - c) \end{aligned}$$

Con $a = b = 0,2$ y $c = 5,7$

El sistema presentado resulta bastante simple, de hecho sería lineal si no fuese por el único término cuadrático zx . No obstante, aún en un sistema de esta simpleza, la naturaleza de las soluciones es compleja. Cerca del origen puede hallarse un equilibrio inestable, pero para observar otras soluciones es necesario apelar a métodos de cálculo numérico.

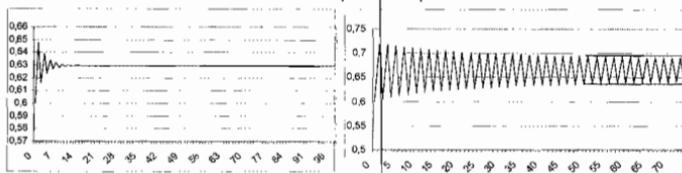
En este flujo, cualquier volumen finito de condiciones iniciales se encoje con el tiempo, por lo que el flujo es contractivo. Todas las trayectorias parecerían converger hacia un atractor extraño.

8.1.2. Propiedades de las Trayectorias

8.1.2.1. Tipos de Trayectorias

Trayectoria periódica: cualquier trayectoria que pase a través de un punto sobre el cual había pasado antes debe continuar repitiendo su comportamiento pasado, siendo por lo tanto "periódico". Dos casos de trayectoria periódica son el punto fijo y los ciclos límite.

Gráfico N°67: Trayectorias periódicas

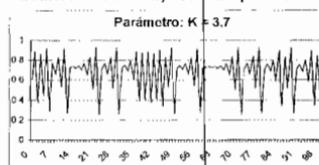


Fuente: Elaboración propia

Trayectoria Cuasi-periódica: Una trayectoria $P(t)$ será denominada cuasi-periódica si para un intervalo grande de tiempo (arbitrario), queda en última instancia arbitrariamente cerca de $P(t)$. Las trayectorias periódicas son casos especiales de trayectorias cuasi-periódicas.

Trayectoria aperiódica: Una trayectoria que no es cuasi-periódica será denominada no-periódica. Si $P(t)$ es no periódica, la trayectoria no se alejará "arbitrariamente" cerca de $P(t)$ cuando el tiempo tiende a infinito.

Gráfico N°68: Trayectoria aperiódica



Fuente: Elaboración propia

Estabilidad de las trayectorias

El concepto de estabilidad es central en el análisis de las propiedades de las trayectorias, y en sentido amplio se asocia a la cuestión de la resistencia a perturbaciones. Respecto a ello, pueden resumirse dos ópticas:

- **Óptica cuantitativa:** se aplica a trayectorias específicas. Las soluciones halladas, que dependen de las condiciones iniciales, deben resistir pequeñas perturbaciones impuestas al comienzo o durante la evolución del sistema, fruto de forzamientos inevitables, tanto intrínsecos (fluctuaciones termodinámicas) como extrínsecos (ruido). Desde este punto de vista,

solamente las soluciones estables (aquellas que “resisten”) son físicamente observables.

- **Óptica cualitativa:** refiere a la definición del sistema en sí mismo. Comparado con el mundo, cualquier abstracción esta empapada de numerosas aproximaciones y los parámetros de control no son determinados con precisión infinita. En este sentido, el modelo analítico debe ser robusto, es decir, sus predicciones no deben ser muy sensibles a las imprecisiones antes mencionadas. De hecho, esta propiedad falla en los denominados puntos de bifurcación, en los cuales el sistema experimenta cambios cualitativos en su comportamiento. En dicho puntos se dice que el sistema es estructuralmente inestable: la naturaleza de su estado depende sensiblemente de la perturbación

Como se verá a continuación, la dinámica caótica se basa en el estudio de la evolución de trayectorias aperiódicas inestables.

8.1.3. El Estudio de Lorenz³⁹

Lorenz (1965) sintetizó que algunos sistemas hidrodinámicos exhiben trayectorias estables, tendientes a un equilibrio, mientras que otras oscilan en períodos regulares. En tanto, otras evolucionan en formas irregulares, e incluso, al observarse durante largos períodos de tiempo, parecen no repetir su comportamiento pasado. En tal sentido, la carencia de periodicidad es una característica común en sistemas naturales, y es uno de los elementos que distinguen a los flujos turbulentos.

Operativamente Lorenz trabajó con sistemas de ecuaciones de tipo determinista que conforman idealizaciones de los sistemas hidrodinámicos antes mencionados. En tanto, se focalizó en analizar el comportamiento asintótico de las soluciones, en contraposición al comportamiento transitorio asociado a ciertas condiciones iniciales arbitrarias.

En la mayoría de los sistemas hidrodinámicos, las leyes de comportamiento están expresadas como un *set* de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, contemplando la velocidad, densidad y presión como variables dependientes⁴⁰.

L

³⁹ A continuación se resumen algunos puntos de las conclusiones del trabajo de Lorenz, plasmadas en el paper “Deterministic Non Periodic Flow”. La traducción es propia.

Para ciertos propósitos, muchos sistemas pueden ser tratados como conservativos, en los cuales la energía total, o alguna otra magnitud, no varía con el tiempo. Al buscar el estado final del sistema, el uso de este tipo de ecuaciones es insatisfactorio, dado que los últimos valores de cualquier magnitud conservativa deberían igualar al valor inicial prefijado arbitrariamente. Esta dificultad puede soslayarse al incluir un proceso disipativo, convirtiendo a las ecuaciones en no-conservativas, y también incluyendo "forzamientos" térmicos o mecánicos, evitando que el sistema termine en un estado de reposo. Si el sistema va a ser determinista, las funciones de "forzamiento"⁴¹, deben también variar según algún tipo de regla determinista.

En su trabajo, Lorenz abordó específicamente el estudio de sistemas finitos de ecuaciones diferenciales deterministas ordinarias, diseñadas para representar sistemas hidrodinámicos disipativos "forzados", estudiando las propiedades de las soluciones no periódicas de tales ecuaciones.

En tanto, Lorenz comenta que no resulta obvio que tales soluciones existan. De hecho, en sistemas disipativos gobernados por *sets* finitos de ecuaciones lineales, un forzamiento constante conlleva a una reacción constante, mientras que un forzamiento periódico conlleva una reacción periódica. Por este motivo, los flujos no periódicos en algunas ocasiones han sido observados como el resultado de forzamientos estocásticos o aperiódicos.

El razonamiento que guía la conclusión precedente no es aplicable cuando las ecuaciones que gobiernan al sistema no son lineales. Si las ecuaciones contienen términos que incorporan la propiedad de advección⁴² un "forzamiento" constante puede generar una reacción variable.

Tabla N°14: Perturbaciones y reacciones (Idem Tabla N°3)

	Sistemas lineales	Sistemas no-lineales (advectivos)
Perturbación constante	Reacción constante	Puede generar reacción variable
Perturbación variable	Reacción variable	Reacción variable

Fuente: Elaboración propia

⁴⁰ No obstante, como se verá mas adelante, Lorenz apelará al uso de un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias.

⁴¹ Es decir, aquellas ecuaciones que explican el comportamiento de las perturbaciones exógenas.

⁴² El transporte de alguna propiedad del fluido por el movimiento del fluido en sí mismo.

Ecuaciones de convección de Saltzman

Lorenz se vale de un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias (ecuaciones de convección de Saltzman), las cuales presentan un ejemplo sencillo de flujos deterministas aperiódicos:

$$\frac{\partial}{\partial t} \nabla^2 \psi = -\frac{\partial(\psi, \nabla^2 \psi)}{\partial(x, z)} + \nu \nabla^4 \psi + g\alpha \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \theta = -\frac{\partial(\psi, \theta)}{\partial(x, z)} + \frac{\Delta T}{H} \frac{\partial \psi}{\partial x} + k \nabla^2 \theta \quad (2)$$

Se define:

- ψ : Función "stream" para el caso de un flujo bidimensional
- θ : desvío de la temperatura respecto al estado de no convección
- g : aceleración de la gravedad
- α : coeficiente de expansión térmica
- ν : viscosidad kinemática
- k : conductividad térmica

Realizando algunas transformaciones, Lorenz plantea el siguiente sistema:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \sigma(y-x) \\ \frac{dy}{dt} &= \rho x - y - xz \\ \frac{dz}{dt} &= -\beta z + xy \end{aligned}$$

Donde x , y y z son variables dependiente y σ , ρ y β son parámetros.

Lorenz estudió el sistema para los siguientes valores de los parámetros: $\sigma = 10$, $\beta = 8/3$ y $\rho = 28$. Luego el sistema queda definido del siguiente modo:

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= 10(y-x) \\ \frac{dy}{dt} &= 28x - y - xz \\ \frac{dz}{dt} &= -\frac{8}{3}z + xy\end{aligned}$$

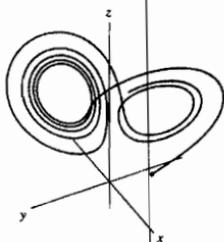
Se define el campo vectorial (espacio tridimensional):

$$F(x, y, z) = \left(10(y-x), 28x - y - xz, -\frac{8}{3}z + xy \right)$$

Los puntos de equilibrio son (x, y, z) para los cuales el campo vectorial es cero, es decir, $F(x, y, z) = (0, 0, 0)$. Por cálculo directo, los puntos de equilibrio son $(0, 0, 0)$, $(6\sqrt{2}, 6\sqrt{2}, 27)$ y $(-6\sqrt{2}, -6\sqrt{2}, 27)$.

A partir de un punto inicial de una solución se puede proyectar la trayectoria de la misma trazando una curva cuyo vector velocidad sea igual al campo vectorial en ese punto. Por ejemplo, para el punto inicial $(x(0), y(0), z(0)) = (10, 7, 7)$ el campo vectorial correspondiente es $F(10, 7, 7) = (-30, 203, 154/3)$. Al desplazarse a lo largo de la trayectoria, se calcula el campo vectorial y de acuerdo al mismo se ajusta el vector velocidad. Usando tal método puede comenzar a verse gráficamente las primeras "vueltas" del atractor de Lorenz.

Figura N° 3: Porción de la curva solución del sistema de Lorenz con condición inicial $(10,7,7)$



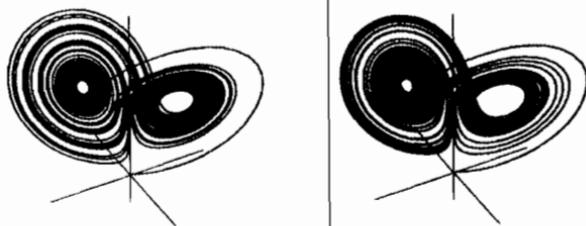
Fuente: Blanchard et al (1998)

El problema fundamental subyace en que al margen de algunos casos particulares, no es posible resolver el sistema analíticamente, es decir, "encontrar una fórmula" para las soluciones. Por ello, hay que apelar a la aplicación de métodos numéricos.

Algunas aproximaciones numéricas de las soluciones

Si se toma la condición inicial $(0,1,0)$, la solución parece no arrojar ningún patrón regular, sino todo lo contrario, la coordenada x "salta" de valores positivos a negativos de manera impredecible. Ahora bien, si se fija la condición inicial en $(0,1.001,0)$, es decir, modificándola infinitesimalmente respecto a la anterior, la solución resultante, además de vagar erráticamente, es significativamente distinta a la primera. En este caso, "significativamente" quiere decir que la diferencia no guarda relación con el desvío inducido en la condición inicial. Por ello se dice que este tipo de sistemas son "sensibles a las condiciones iniciales". En las dos iteraciones siguientes puede observarse gráficamente la diferencia entre ambas soluciones.

Figura N°4: Solución del sistema de Lorenz con punto inicial $(1,0,1)$ y $(1,1.001,0)$ respectivamente



Fuente: Blanchard et al (1998)

En síntesis, de acuerdo al sistema planteado y de acuerdo a los valores fijados para los parámetros, e iterando las proyecciones hacia el infinito, las soluciones aproximadas numéricamente convergen al famoso atractor con forma de mariposa. La complejidad de la figura puede llegar a explicarse por la coexistencia de trayectorias estables e inestables, dentro de un intrincado juego de atracción y repulsión en zonas del espacio de fases. En este sentido, las trayectorias son totalmente aperiódicas (nunca se repiten a sí mismas) pero al mismo tiempo la evolución del sistema se concentra en regiones específicas del espacio de fases, dejando claros huecos o espacios vacíos en el mismo. En palabras de Mindlin (2008): *"al describir un atractor extraño (el de Lorenz), mencionamos su estructura heterogénea; esas "bandas" prohibidas que le dan una apariencia de cinta maltrecha. Un atractor extraño, de hecho, es una solución que está condenada a vagabundear por una región acotada del espacio de las fases, esquivando "cosas" (...). En este sentido, y sin ninguna intención de sonar como un psicoanalista porteño, podemos decir que los agujeros definen la estructura (...). ¿Qué son esos elementos que el atractor extraño evita? Son órbitas periódicas, inestables, que coexisten con el atractor. Curvas cerradas, de tamaño finito, que corresponden a soluciones posibles del sistema en las cuales el comportamiento es periódico, pero, al ser inestables, no constituyen soluciones que lleguen a observarse"*.

Parecería que la trayectoria no tuviese ningún punto determinado hacia donde tender, sino que viaja de un ala hacia la otra siendo repelida y atraída al mismo tiempo, estando consecuentemente acotada en el espacio. Dentro de tal dinámica, la trayectoria se "dobla" sobre sí misma. En las gráficas que comúnmente pueden observarse, parecería que la curva se corta a sí misma repetidas veces, pero esto es

sólo una consecuencia de trabajar sobre dos dimensiones. Respecto a ello, las leyes de la mecánica impiden que una trayectoria en el espacio de fases se corte a sí misma.

Nótese que, no obstante la aperiodicidad e inestabilidad del sistema, la gráfica resultante del mapeo de las trayectorias presenta cierta regularidad e, incluso, ciertas cualidades estéticas. Citando nuevamente a Mindlin (2008):

La suavidad de las curvas es consecuencia de que el sistema es determinista: instante a instante, no hay capricho, ni saltos, ni misteriosas intervenciones del azar. Pero imaginemos que seguimos con el dedo una trayectoria, como si quisiéramos desandar un laberinto ayudándonos de un hilo. Lo intrincado de esta madeja hace que de tomar dos hebras separadas mínimamente, luego de algunos pasos podamos terminar de un lado u otro de esta suerte de "máscara".

La Inestabilidad de Flujos No Periódicos

El resultado de la dinámica atractora "extraña" (o mejor dicho, caótica) tiene grandes consecuencias cuando el sistema considerado es un sistema observable no periódico cuyo estado futuro se desee predecir. Implica que dos estados que difieren en imperceptibles cantidades pueden eventualmente evolucionar en dos estados totalmente distintos. Si, entonces, hay algún tipo de error al observar el estado presente, una predicción aceptable de un estado futuro distante parecería imposible.

En suma, Lorenz demostró que, sujeta a ciertas condiciones de unicidad, continuidad y acotamiento, una trayectoria central, la cual estaría libre de propiedades transitorias, es inestable si es aperiódica. En tanto, una trayectoria no central, caracterizada por propiedades transitorias, no será estable si es aperiódica, y, si es estable, tal estabilidad es una de sus propiedades transitorias, la cual tiende a esfumarse a medida que el tiempo progresa. En vistas de la imposibilidad de medir las condiciones iniciales en forma precisa, y por lo tanto distinguiendo entre una trayectoria central y una trayectoria no central cercana, todas las trayectorias aperiódicas son efectivamente inestables desde el punto de vista práctico de la predicción.

Algunas conclusiones del trabajo de Lorenz

El autor sintetiza que ciertos sistemas hidrodinámicos conservativos, forzados terma o mecánicamente, pueden exhibir comportamientos periódicos o irregulares cuando no existe tal periodicidad o irregularidad en el proceso de forzamiento. Tales flujos periódicos y no periódicos se observan en modelos experimentales aún cuando el proceso de forzamiento es mantenido constante, dentro de los límites del control experimental.

En este sentido, los principales resultados del estudio de Lorenz conciernen a la inestabilidad de soluciones aperiódicas. Una solución de este tipo, libre de comportamientos transitorios debe ser inestable, en el sentido que tales soluciones que se aproximaban temporalmente no continúan haciéndolo. Una solución aperiódica con componentes transitorios es a veces estable, pero **en tal caso su estabilidad es uno de sus propiedades transitorias, la cual tiende a desvanecerse.**

Por último, Lorenz comenta que cuando los resultados concernientes a la inestabilidad de flujos no periódicos son aplicados a la atmósfera, la cual es ostensiblemente no periódica, indican que la predicción de un futuro suficientemente lejano es imposible bajo cualquier método, a menos que las condiciones iniciales sean conocidas con exactitud. En vistas de la inevitable poca exactitud e incompletitud de las observaciones (climáticas), **predicciones de largo plazo parecen no existir.**

8.1.4. La dinámica caótica en pocas palabras

Resumidamente, la dinámica caótica hace referencia a sistemas deterministas dinámicos no lineales con soluciones aperiódicas y acotadas que presentan (*hiper*)sensibilidad a las condiciones iniciales. Las principales características y/o implicancias de la dinámica caótica son las siguientes:

- Comportamientos irregulares ("aparentemente aleatorios") que son generados mediante ecuaciones deterministas.
- La irregularidad responde a la dinámica endógena del sistema y no a perturbaciones exógenas aleatorias
- La sensibilidad a las condiciones iniciales hace que cualquier *shock* exógeno, por pequeño que sea, tienda a propagarse y amplificarse a

medida que el sistema evoluciona, generado efectos permanentes en el largo plazo

- Esto genera que, dada la existencia insoslayable de errores de medición, la predicción de estos sistemas, o bien sea imposible, o esté acotada al corto plazo.

8.1.5. Dinámica Caótica: Una definición formal

Una definición formal es la propuesta por Devaney (1989): El mapeo de un conjunto dentro de sí mismo, $f:V \rightarrow V$, es caótico si:

- Exhibe dependencia a las condiciones iniciales.
- Es topológicamente transitivo.
- Los puntos periódicos son densos en V .

Para resumir, un sistema dinámico caótico se caracteriza por tres elementos según la definición anterior. Primero, su comportamiento es impredecible debido a su sensibilidad a las condiciones iniciales, segundo, es un sistema cuyo atractor es irreducible, es decir que la unión de dos atractores disjuntos no se considera como atractor, debido su carácter topológicamente transitivo y finalmente, en medio de este comportamiento aleatorio, el sistema presenta, sin embargo, un aspecto de regularidad debido a los puntos periódicos densos.

8.1.6. Dinámica caótica en un mapa unidimensional

La denominada ecuación logística consiste de un sencillo proceso iterativo y retroalimentado, donde el resultado de la ecuación en un momento t constituye el valor que se utilizará para calcular el resultado en $t+1$, y así sucesivamente.

La forma funcional es la siguiente:

$$x_{t+1} = Kx_t(1-x_t)$$

Nótese que la misma puede dividirse en dos partes:

- Parte expansiva: Kx_t , dado que habitualmente se supone que $K > 1$. De esta forma, en esa parte de la expresión, el valor futuro de x_t depende directamente

de K . Si la expresión fuese sencillamente $x_{t+1} = Kx_t$, el valor de x_t al cabo de un cierto número de iteraciones tenderá a infinito. Nótese que si $K < 1$ la trayectoria futura tiene rápidamente a cero, aún incluyendo el factor $(1-x_t)$.

- Parte reactiva: $(1-x_t)$, también denominado factor de corrección. Este factor es el que introduce la dinámica singular de la ecuación logística, dado que es lo que impide que la trayectoria de la variable crezca exponencialmente hacia el infinito, acotando su evolución en el espacio. Ténganse en cuenta que para que el factor tenga lógica, el valor de la variable x_t debe utilizarse normalizado⁴³. De esta forma, como el factor $(1-x_t)$ habitualmente⁴⁴ es menor a cero, el mismo hace decrecer la expansión generada por Kx_t .

En síntesis, la ecuación logística acciona dos dinámicas opuestas: cuánto más se incrementa el valor de x_t , más disminuye el del factor $(1-x_t)$, ergo acotando la evolución final.

En síntesis, pueden listarse las siguientes características de la ecuación logística:

- Es un proceso iterativo
- Es no lineal, lo cual puede observarse fácilmente aplicando propiedad distributiva: $x_{t+1} = Kx_t - Kx_t^2$
- Es determinista, dado que no incluye componentes estocásticos
- Presenta una dinámica expansiva, dada por Kx_t , y reactiva, dada por $(1-x_t)$.

El Valor del Parámetro K

La singularidad de la ecuación logística presentada radica en que la misma genera trayectorias marcadamente diferentes según sea el valor del parámetro K . Como se verá a continuación, el sistema habitualmente converge a un punto fijo o a un ciclo límite. Pero, para ciertos valores de K , el sistema comienza a comportarse erráticamente y en forma totalmente aperiódica, curiosamente, puede comprobarse que dicho comportamiento es dinámicamente caótico.

L

⁴³ Esto es, solo puede variar entre 0 y 1, siendo $x_t = 1$ el valor máximo posible de la variable, $x_t = 0$ el mínimo, y $x_t = 0.5$ correspondería al 50% de la población, independientemente de su unidad de medida.

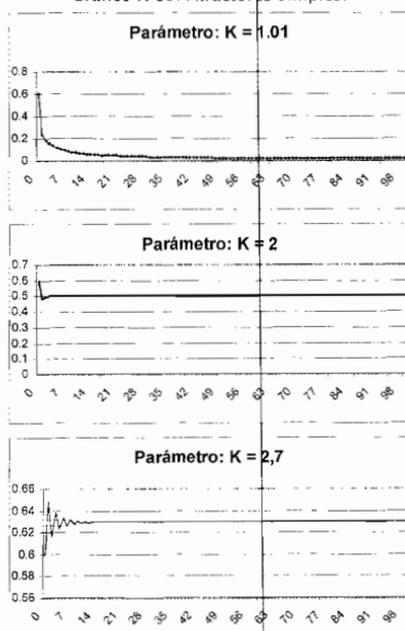
⁴⁴ Con la excepción que el valor inicial x_t sea cero, en cuyo caso no existirá proceso de retroalimentación.

Para observar las dinámicas antes mencionadas, a continuación se presenta la evolución del mapa logístico a lo largo de 100 iteraciones para distintos valores del parámetro "K" con un valor inicial de X de 0.645.

1.1.1.1. Caso 1: Punto Fijo: $K = 1,01$ $K = 2$, $K = 2,7$

Como se observa, si se fija el valor del parámetro K en 1.01 la serie rápidamente converge a cero. Si se fija en 2, casi instantáneamente converge al valor 0.5. Si se fija en 2.7, luego de un par de iteraciones, se estabiliza en el valor 0.63. La convergencia asintótica hacia un punto estable indica que se está frente a un atractor. Es decir, en los casos anteriores, los valores 0, 0.5 y 0.63 constituyen atractores simples o puntos fijos, atrayendo el movimiento de la función $X(t)$ hacia un punto estable.

Gráfico N°69: Atractores Simples.



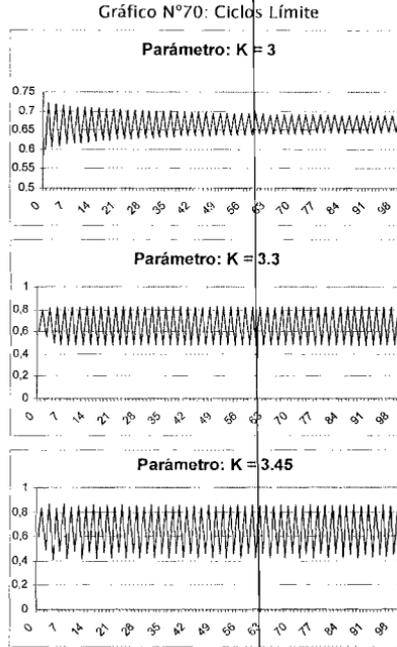
Fuente: Elaboración propia.

L

⁴⁵ Se utilizan los ejemplos presentados por Moisés José Sametband, en "Entre el Orden y el Caos: La Complejidad", páginas 111-118.

Caso 2: Ciclo Límite: $K = 3$, $K = 3,3$, $K = 3,45$

Para $K = 3.3$ se observa un comportamiento distinto: la serie se estabiliza en valores alternados: aproximadamente 0.48 y 0.82 (convergencia a un ciclo límite).

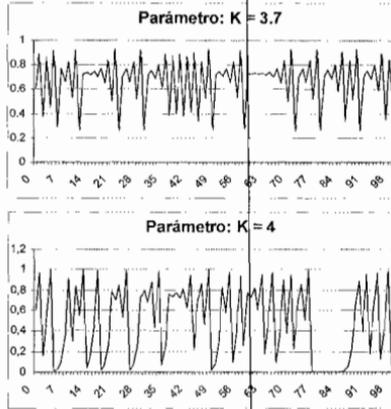


Fuente: Elaboración propia.

Caso 3: Caos: $K = 3,7$, $K = 4$

En los casos con valores de $K = 3.7$ y $K = 4$, o cualquier otro a partir de $K = 3.7$, se observan trayectorias totalmente aperiódicas. Esto es, los valores de X oscilan en forma irregular e imprevisible entre 1 y 0, dando la "impresión" que se trata de un proceso estocástico. No obstante, es generado por la misma ecuación que en los casos anteriores.

Gráfico N°71: Ciclo Aperiódico: ¿Caos?

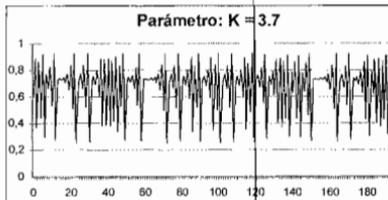


Fuente: Elaboración propia.

En primera instancia, podría llegar a pensarse que en la porción de la evolución observada (las primeras 100 iteraciones) no llega a consolidarse un ciclo (periódico o cuasi-periódico), correspondiendo la gráfica a una trayectoria transitoria.

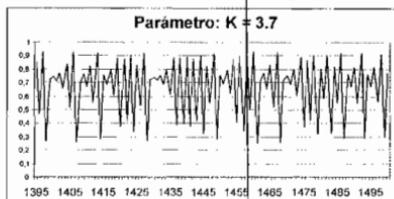
No obstante, si se expande al análisis a 200 iteraciones, tampoco llega a consolidarse un ciclo, como puede observarse en la figura siguiente. Para reafirmar el argumento, al cabo de 1.500 iteraciones, la evolución de la serie es tan errática como en las primeras 100.

Gráfico N°72: Evolución al cabo de 200 iteraciones



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico N°73: Evolución entre las 1.400 y 1.500 iteraciones.



Fuente: Elaboración propia.

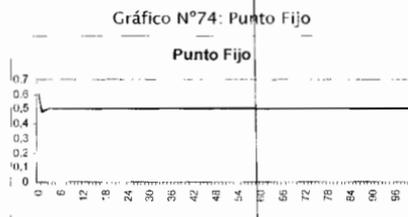
Debe quedar en claro que los razonamientos anteriores solamente tienen por objeto mostrar una interpretación gráfica e intuitiva de la dinámica compleja del fenómeno en cuestión, constituyendo evidencia a favor de la existencia de dinámica caótica pero no confirmando contundentemente la misma. No obstante, puede demostrarse que la ecuación logística, para determinados valores del parámetro K , ostenta, en efecto, dinámica caótica, cumpliendo con las condiciones de sensibilidad a las condiciones iniciales, transitividad topológica y puntos periódicos densos.

La utilidad de la secuencia presentada, radica en observar cómo la evolución de la serie presenta comportamientos totalmente diferentes según como se fije el "parámetro K ", llegando incluso a una evolución errática, que aparenta ser aleatoria, pero que en realidad deviene de determinados valores asignados a un simple algoritmo recursivo. Por ello, dada una serie temporal (como por ejemplo la anterior), es viable realizar algún tipo de testeo para tener información acerca del nivel de sensibilidad a las condiciones iniciales de la misma.

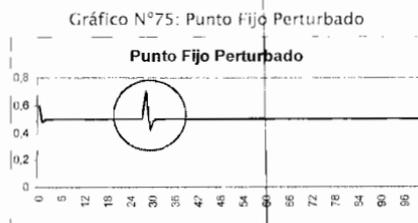
8.1.7. La perturbabilidad de los senderos estables e inestables

Un aspecto fundamental de los senderos caóticos es su nivel de perturbabilidad. Es decir, su reacción frente a *shocks* exógenos. A diferencia de los senderos estables, dada una perturbación exógena, puede que un sendero inestable nunca regrese a su trayectoria original. En el caso de los senderos caóticos, esta perturbabilidad puede darse incluso ante *shocks* imperceptibles. Esta es tal vez una de las mayores implicancias de la dinámica caótica. A los fines de dar una idea intuitiva del concepto, en esta sección se presentan casos de evoluciones de senderos estables e inestables.

En las figuras siguientes se grafica un ejemplo. La primera figura corresponde a un flujo estable, el cual transita dentro de un sendero dinámico equilibrado. Si se introduce una perturbación exógena, se observa la generación de una fluctuación, la cual es temporal, es decir, luego de un tiempo el sistema regresa al sendero original.



Fuente: elaboración propia



Fuente: elaboración propia

Gráfico N°76: Diferencia entre las dos series anteriores

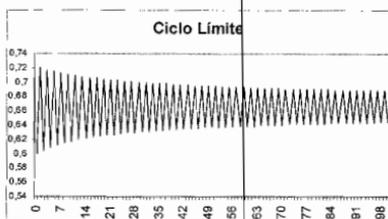


Fuente: elaboración propia

En la secuencia siguiente se presenta la misma lógica que en el caso anterior pero en un ciclo límite (también estable). Nótese que al introducir una perturbación (exógena), el sistema fluctúa fuertemente, de hecho el *shock* subyace algún tiempo dentro del

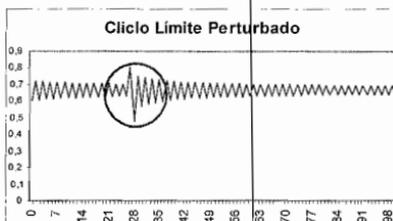
sistema pero, al igual que en el caso anterior, se desvanece en el mediano plazo, regresando el flujo a su sendero original.

Gráfico N°77: Ciclo Límite.



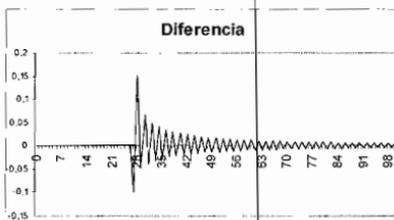
Fuente: elaboración propia

Gráfico N°78: Ciclo Límite Perturbado.



Fuente: elaboración propia

Gráfico N°79: Diferencia.



Fuente: elaboración propia

Si bien la dinámica cualitativa de los dos flujos presentados son diferentes (punto fijo y ciclo límite, respectivamente), ambos son dinámicamente estables y las fluctuaciones (entendidas como desviaciones del flujo por fuera del sendero) son producto de

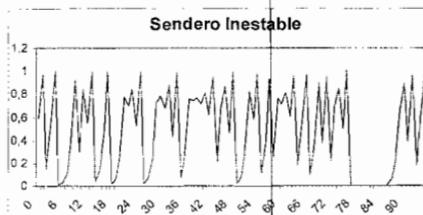
perturbaciones exógenas. Además, en ambos casos, los efectos del *shock* son transitorios, esto es, que luego de cierto tiempo el flujo vuelve al sendero original.

Senderos Inestables

Para comenzar a responder al interrogante planteado, se presenta el flujo de un sistema dinámico inestable. En este caso, se utiliza un sistema caótico, al cual se le aplicará la misma metodología que en los casos anteriores, es decir, introducir una perturbación exógena para luego observar su posterior evolución.

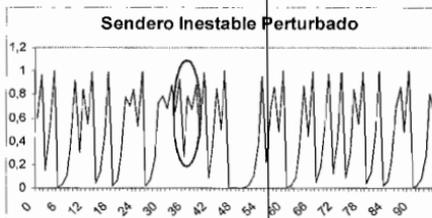
Como se observa en el conjunto de figuras siguientes, la introducción de un *shock* exógeno tiene consecuencias totalmente distintas que el en caso de los flujos estables. Esto es, luego de perturbar el sistema, su evolución cambia erráticamente, incluso amplificando el tamaño del *shock* inicial. Esto puede observarse más claramente en la tercera figura, la cual grafica la diferencia entre la serie original y la serie perturbada. Véase que la diferencia comienza siendo pequeña y luego tiende a agrandarse, achicarse por momentos, y luego agrandarse nuevamente, sin seguir ningún patrón observable.

Gráfico N°80: Sendero Inestable.



Fuente: elaboración propia

Gráfico N°81: Sendero Inestable Perturbado.



Fuente: elaboración propia

Gráfico N°82: Diferencia con y sin shock.



Fuente: elaboración propia

Luego, si se perturba un sistema caótico, puede resumirse lo siguiente:

- El sistema cambia su evolución, sin retornar a su sendero inicial, incluso en el largo plazo
- El tamaño de la perturbación no se condice con el cambio en la evolución del sistema
- El tamaño del *shock* persiste en el largo plazo e incluso tiende a amplificarse a medida que el sistema evoluciona
- No es posible predecir la evolución futura del sistema

8.2. Anexo 2: Sistemas y Atractores

8.2.1. Sistemas deterministas y no deterministas

Los sistemas pueden clasificarse en:

- Sistemas deterministas
- Sistemas no deterministas

Un sistema determinista es aquel donde puede encontrarse ("determinarse") una solución o estado futuro del mismo dadas las ecuaciones de movimiento del modelo y la especificación de las condiciones iniciales, con un margen de error (generalmente relacionado a las fallas de medición). En un sistema determinista solamente puede haber un solo futuro posible para cada estado.

Un sistema no determinista es aquel donde no es posible especificar fehacientemente el estado futuro del sistema (incluso conociendo con exactitud las condiciones iniciales) y, en general, se asocia a la idea de sistema estocástico.

Por otro lado, los sistemas pueden ser estáticos o dinámicos. La principal diferencia radica en el enfoque de estudio respecto a la variable temporal: en los sistemas estáticos se estudia el estado final o soluciones del sistema (en forma "comparativa" respecto a la situación inicial), mientras que en los sistemas dinámicos se estudia la evolución de las variables a lo largo del tiempo.

Luego, los sistemas dinámicos pueden clasificarse según la forma de su evolución temporal, en el sentido de si presenta cierta regularidad o no en su trayectoria, relacionada al concepto de atractor. Según este enfoque, la evolución de un sistema dinámico puede ser "atraída" a los siguientes estados:

- Punto fijo: el sistema converge a un valor determinado y se estabiliza en el mismo o en el límite del mismo.
- Ciclo límite: el sistema converge a una fluctuación entre ciertos valores, repitiendo su comportamiento a partir de cierto horizonte temporal. Tal fluctuación puede ser simple (alternar entre dos valores) o más compleja (alternar entre varios).
- Toro
- Atractor extraño
- No atracción

En general, los tres primeros casos son más proclives a ser asociados con la idea de estabilidad, mientras que los últimos dos pueden ser caracterizados como sistemas inestables.

Sistemas deterministas y sistemas estocásticos

En general, se asume que es posible predecir el estado futuro de un sistema determinista (suponiendo que el mismo representa las "leyes" del fenómeno en forma correcta) con un "margen de error". Dicho margen de error en la predicción sería del mismo nivel que los errores de observación o medición. Es decir, si el sistema formulado es el correcto, y ante ausencia de errores observación o fallas de medición, el pronóstico de estado futuro sería, simplemente, correcto.

En tanto, los procesos estocásticos describen sistemas de complejidad irreducible, resultado del elevadísimo número de grados de libertad, lo cual hace que su comportamiento sólo pueda predecirse en términos probabilísticos (*Barnet et al, 1997*).

8.2.2. Sistemas conservativos y sistemas disipativos

Los sistemas conservativos son aquellos que mantienen ciertas propiedades a lo largo del tiempo o, simplemente, que conserva la energía. En palabras de Schuchshny (2001), "*todo sistema dinámico cuyo volumen del espacio de estados es asintóticamente invariante bajo su propia dinámica es conservativo*". Un caso conocido de sistemas conservativos son los sistemas Hamiltonianos.

Como en este tipo de sistemas la energía se mantiene constante a lo largo del tiempo, las trayectorias no son atraídas hacia regiones específicas en el estado de fases, no pudiendo por lo tanto existir puntos fijos estables, ciclos o atractores extraños.

En tanto, los sistemas disipativos se caracterizan por la contracción de volúmenes del espacio de fases a lo largo del tiempo. Dada la disipación (o pérdida de energía), la dinámica de un sistema cuyo espacio de fases es n -dimensional, será confinada a un subconjunto de dimensión menor a " n ". En palabras de Schuchshny (2001):

En un sistema no conservativo o disipativo las trayectorias no perturbadas se aproximan a un subconjunto del espacio de fases que se denomina atractor. En este proceso se reduce, a veces de manera drástica, la dimensionalidad del espacio de fases efectivamente "visitado" por el

sistema dando lugar, de esta manera, a una disminución de los grados de libertad efectivos.

Un punto fundamental, es que la disipación permite distinguir entre comportamientos transitorios y permanentes.

Por ejemplo, en un sistema disipativo de dos o menos dimensiones caracterizado por un único ciclo límite global, una vez que las evoluciones transitorias se han esfumado, subyace una única órbita unidimensional, el ciclo

8.2.3. Atractores

Un atractor puede definirse como el sub-espacio dentro del espacio donde quedan "atrapadas" las trayectorias de un sistema dinámico luego de un número lo suficientemente grande de iteraciones. Esto muestra el comportamiento de largo plazo del sistema. En cierta forma, el atractor representa la naturaleza del sistema dinámico, mostrando el comportamiento o dinámica subyacente que permanece a medida que el tiempo transcurre hacia el infinito.

En el estudio de sistemas dinámicos (disipativos) la búsqueda o reconstrucción de un atractor constituye una estrategia muy útil, dado que, como fue dicho, permite reducir los grados de libertad para estudiar el sistema, al observar el comportamiento asintótico del mismo.

Si bien el concepto de atractor parecería bastante intuitivo, existe cierta discrepancia a lo largo de la literatura respecto a su definición formal estricta (sobre todo a lo que respecta los atractores extraños y caóticos). Por ello, a continuación se presentan muy sintéticamente algunas definiciones necesarias para delimitar el concepto de atractor, a saber, las de conjunto invariante, conjunto de atracción y finalmente atractor propiamente dicho.

Conjunto invariante

En un sistema discreto, se dice que el conjunto $S \subseteq X$ es invariante bajo la acción del mapeo T si:

$$\begin{aligned}\phi_t(S) &\subseteq S & \forall t \in \mathbb{Z} \\ T^n(S) &\subseteq S & \forall n \in \mathbb{Z}\end{aligned}$$

Esto sencillamente significa que cuando se aplica el mapeo T a cualquier punto de S , se obtiene otro punto de S .

En general, se acepta la propiedad de invariante como "deseable", dado que asegura que la consistencia teórica de los modelos. Es decir, asegura que si a una función o mapeo T se le imputan precios (positivos), el precio resultante también sea positivo.

1.1.2. Conjunto Atractor o Conjunto de Atracción

Dado un conjunto invariante S como el antes definido. Si existe un "vecindario" o entorno de S , denominando U , tal que si al aplicar el mapeo T a cualquier punto de U ($t > 0$) la órbita se aproxima al conjunto S a medida que el tiempo tiende a infinito. En otros términos, S es un conjunto atractor si a puntos de un espacio U definido alrededor del espacio S se le aplica el proceso dinámico T , las órbitas terminarán atrapadas dentro del espacio S a medida que el proceso T se aplica hasta el infinito.

1.1.3. Atractor

Si bien en muchos casos el concepto de atractor se identifica con el de conjunto atractor, no son exactamente lo mismo. En este sentido, Eckmann y Ruelle (1985), sostienen que un atractor es un subconjunto irreductible dentro de un conjunto de atracción.

En primer lugar, el hecho que un conjunto sea un conjunto atractor no significa que todas sus partes sean atractoras. Por ello, la propiedad de irreductibilidad surge como característica distintiva del concepto de atractor. Ello significa que tal subconjunto no puede separarse en dos conjuntos disjuntos y se observa cuando una órbita, comenzando desde cualquier punto sobre el atractor, a medida que pasa el tiempo, se ubica arbitrariamente cerca de cualquier otro punto. Esta propiedad también se conoce como transitividad topológica.

Dicho todo esto, y en cierta forma regresando a la definición "informal" dada al inicio del capítulo, se coincide con Medio *et al* (2011) quienes sintetizan que, a los fines operativos y sin "demasiada rigurosidad", *un atractor es un conjunto sobre el cual los*

puntos de un mapeo iterativo o flujo se acumulan después de un lapso lo suficientemente grande de tiempo⁴⁶.

A continuación se clasificarán algunos tipos de atractores.

Tipos de atractores

Punto Fijo

El caso más simple de atractor es el punto fijo estable (equilibrio dinámico estable en economía). Es decir, un punto x_0 atrae al movimiento de la función $x(t)$ si:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = x_0$$

Debe quedar claro que x_0 constituye un estado dinámico, es decir, un valor que adquiere una trayectoria a medida que la misma evoluciona. En el caso del punto fijo, el valor es constante, lo cual significa que la trayectoria permanece en dicho valor, pero no está "quieta", de decir, el sistema sigue evolucionando. Es lo que comúnmente se conoce en la jerga de la teoría de crecimiento económico como "sendero de crecimiento equilibrado"

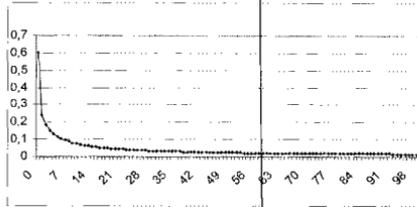
Este equilibrio es definido como estable si todas las trayectorias que se parten en un entorno del mismo confluyen a dicho punto, es decir, el sistema se estabiliza en dicho valor independientemente del punto de partida.

Muchas veces, una vez que se ha identificado que el sistema tiene un punto fijo, se estudia la forma en la cual se arriba al mismo. Es decir, la velocidad (cantidad de iteraciones) y la forma que describe la trayectoria a través de la cual se alcanza el equilibrio dinámico. Respecto a esto último, la misma puede ser directa, puede alternar entre distintos valores más o menos erráticamente o también en forma de espiral.

L

⁴⁶ Traducción propia.

Gráfico N°83: Punto Fijo



Fuente: *Elaboración propia*

Gráfico N°84: Punto Fijo

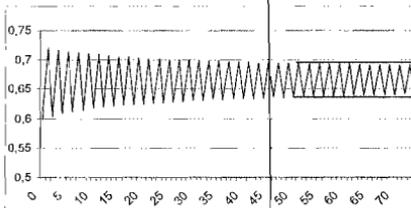


Fuente: *Elaboración propia*

Ciclo límite

Un ciclo límite es un atractor asintóticamente estable donde las trayectorias del sistema, en lugar de confluir en un punto fijo, oscilan entre varios puntos, generando un ciclo regular y estable pero no constante, sino oscilatorio. Es decir, en el límite, la trayectoria del sistema termina siendo "atrapada" por un ciclo, visitando los mismos puntos en el mismo orden. Por ello, este tipo de atractores es también denominado "ciclo límite", es decir, dado que configura el comportamiento repetido (periódico) luego de un número grande de iteraciones.

Gráfico N°85: Ciclo Límite

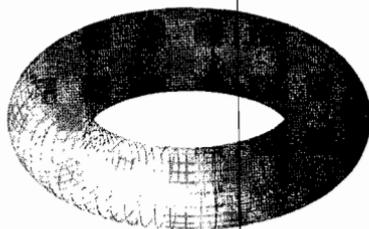


Fuente: *Elaboración propia*

Atractor Cuasi-Periódico

En este caso, las órbitas o trayectorias del sistema nunca se repiten a sí mismas. En este caso, la aperiodicidad es formada por dos oscilaciones independientes, pero acopladas, donde una se encierra en torno a la otra, formando la figura de un anillo solenoide. No obstante cabe destacar que la evolución es cuasi periódica cuando los períodos de los osciladores acoplados son incommensurables (el cociente entre períodos es un número irracional). En este caso, la trayectoria en el espacio de fases se irá "enrollando" en torno a la otra, pero durante el transcurso del tiempo cada vuelta pasará por un lugar distinto a la anterior, cubriendo toda la superficie del anillo y, por lo tanto, nunca repitiendo su trayectoria anterior. Este tipo de atractor es comúnmente denominado "toro".

Gráfico N°87: Ciclo Límite



Este "toro" o anillo solenoide puede entenderse como el resultado de la interacción entre dos ciclos límites, uno representado por los anillos trasversales a la figura y el otro por los anillos longitudinales. Al combinar ambos ciclos en una misma figura, y repitiendo los mismos hasta el infinito, se forma la figura tridimensional con forma de "rosquilla". Cabe destacar que para formar la misma el ciclo no es estrictamente regular (periódico), dado que de lo contrario una vez completada la primera vuelta, la segunda repetiría exactamente a esta última, no completando la figura (es decir, no llenaría todo el espacio). Para ello, la "segunda vuelta" debe pasar infinitesimalmente cerca de la primera (sin superponerla), completando así un ciclo "cuasi-periódico". La repetición de esta dinámica durante el transcurso del tiempo (hasta el infinito) va completando todo el espacio y termina generando, en el límite, la figura presentada. Cabe destacar que los valores de las variables representadas corresponden a puntos situados en la superficie de la figura (en otras palabras, el anillo solenoide es "hueco").

Respecto a la sensibilidad del sistema respecto a los puntos de partida, como el sistema es cuasi-periódico, dos trayectorias inicialmente separadas por una diferencia

determinada, mantendrán exactamente esa diferencia a lo largo de toda la evolución del sistema.

Atractor extraño

Los atractores extraños son aquellos que se caracterizan por presentar dimensión fractal. Esto es, el estado final del sistema ya no puede ser representado mediante figuras simples, como puede ser un punto (punto fijo), un círculo (ciclo límite) o un anillo solenoide (toro). En este caso, la dinámica compleja del sistema subyacente, genera un atractor asimismo complejo que puede ser representado geoméricamente mediante un fractal.

Cabe destacar que la estructura de las órbitas de un atractor extraño no son ni periódicas ni cuasi-periódicas.

Los atractores más conocidos son:

- Atractor de Hénon
- Atractor de Lozi
- Atractor de Rossler
- Atractor de Lorenz

A lo largo de la literatura, los atractores extraños son también llamados "caóticos". No obstante, *Barnet et al* (2001), explican que el atributo "extraño" refiere a sus características geométricas, esto es, al hecho de constituir un fractal. En tanto, el atributo "caótico", refiere a una propiedad dinámica, relacionada a la sensibilidad a las condiciones iniciales, como se verá más adelante. De esta forma, ambos atributos son independientes. Luego, siguen los autores, existen atractores caóticos que no son fractales y atractores extraños que no son caóticos.

En sistemas disipativos, un atractor caótico surge cuando la contracción conjunta de volúmenes, que caracteriza a tales sistemas, se forma mediante la contracción en ciertas direcciones, acompañadas por una dilatación menos rápida en las restantes.

No obstante, explican los autores, mapas unidimensionales y no invertibles, que generan órbitas caóticas caracterizadas por presentar sensibilidad a las condiciones iniciales (como por ejemplo el mapa logístico) constituyen un problema curioso.

Estrictamente, no son ni conservativos ni disipativos: podrían ser denominados "anti-disipativos". Estos mapas, presentan solamente el efecto de dilatación y su resultado permanece acotado (dentro de ciertos límites) por efecto de la no-linealidad. Puede pensarse a los mismos como casos límite de mapas (disipativos) bidimensionales, no invertibles, con una contracción muy fuerte en una dirección - tan fuerte que, en el

límite, remanece una única dimensión, a lo largo de la cual órbitas cercanas se separan.

8.3. Anexo 3: Indicador Sintético de Riesgo Argentino

Para evaluar la situación de riesgo macroeconómico, surgen las siguientes dificultades:

- No resulta evidente el conjunto de variables que debe observarse, siendo muy difícil definir un conjunto acotado. Es decir, no es posible definir en forma totalmente objetiva cuál es la mejor situación de un contexto económico.
- Las variables macroeconómicas revisten un alto grado de correlación, por lo que las visiones parciales no pueden considerarse como representativas de una visión global.
- Por otro lado, los objetivos de políticas públicas compiten entre sí, por lo que la evolución favorable de una variable puede ser generada a costa de una evolución desfavorable de otra(s). Lo que resulta necesario destacar es que esta situación no es siempre evidente o, por lo menos, la relación entre las variables no es directa⁴⁷.

Por los motivos previamente señalados, se construyó un índice sintético, que incorpora un amplio espectro de variables, y no un conjunto reducido.

La construcción de indicadores sintéticos implica un gran desafío en términos de agregación de las variables seleccionadas. En esta primera instancia, se ha procedido a testear la evolución del indicador en relación a los períodos de crisis y crecimiento durante el período 1994–2010, dependiendo de la disponibilidad de información.

Hasta el momento se han ensayado dos metodologías. La primera de ella consiste en el tradicional método de análisis de medias y varianzas. Bajo esta metodología, la evolución del indicador se interpreta mediante el análisis de la situación del mismo respecto a su promedio histórico. La segunda metodología muestra un análisis

L

⁴⁷ Por ejemplo, en un negocio privado, una baja de los costos impacta directamente en el resultado, incrementado *ceteris paribus* las ganancias. No obstante, una contracción del gasto público no necesariamente incrementará el superávit fiscal (solamente con cierta probabilidad en el corto plazo).

opuesto al previamente descrito, es decir, se analiza la situación respecto a los valores extremos de cada variable. A fin de poder realizar la evaluación de los objetivos señalados, se ha construido el siguiente indicador:

I. Indicador sistémico

Las variables contempladas en este indicador se detallan a continuación:

1. Resultado Primario Consolidado (en porcentaje del PIB nominal)
2. Exportaciones Netas (en porcentaje del PIB nominal en dólares)
3. Reservas Internacionales (en porcentaje del PIB nominal en dólares)
4. Índice de Pobreza
5. Tasa de Desempleo
6. Coeficiente de *Gini*
7. Riesgo País
8. Evolución Salarial (en porcentaje del PIB nominal)
9. Jubilación Mínima (en porcentaje del PIB nominal)

Metodología

La construcción de cualquier indicador que sintetice el comportamiento de todo un conjunto de variables conlleva el desafío de la agregación, es decir, cómo agregar variables que generalmente están expresadas en diferentes escalas y órdenes de magnitud. La aplicación de metodologías diversas tiene como objetivo convertir a las variables seleccionadas a una escala lo más homogénea posible, con la menor pérdida de información.

En esta instancia, se ha primado el uso de metodologías simples, a los fines de generar los primeros ensayos de construcción de indicadores, para luego realizar los ajustes necesarios a los fines de mejorar la representatividad de los mismos.

La primera metodología ensayada es la conversión de las variables en función de los valores extremos de la misma y la segunda en función de los desvíos respecto al valor medio.

Evolución respecto a extremos

La metodología empleada para poder realizar una síntesis de las variables listadas dentro de un indicador fue la siguiente:

- Se han identificado los valores máximos y mínimos de las variables entre el primer trimestre de 1993 y el último trimestre de 2010.
- Tales valores representan la “peor” o “mejor” situación de la variable en el periodo considerado, definiendo así la situación de mayor o menor riesgo de la serie.
- Para homogeneizar las mediciones, se transforman los valores de la serie dentro de una escala con intervalos decimales entre cero y uno. El valor con mayor riesgo arrojará un valor de uno y el de menor riesgo un valor de cero.
- Los valores intermedios se transforman dentro de la escala definida entre cero y uno dentro de diez intervalos de idéntica amplitud.
- El índice total será la suma ponderada de cada una de las series reconvertidas a la escala antes definida.

Desvíos respecto a la media

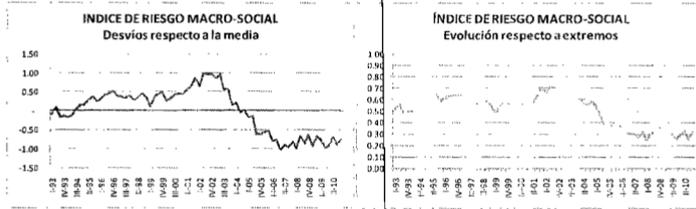
Bajo esta segunda metodología, se convierten las variables estandarizadas en un formato homogéneo (todos los desvíos por encima de la media son considerados una mala situación mientras que los que se encuentren por debajo se consideran una buena situación) y se agregan las mismas con idéntica ponderación, dando origen así a un indicador de riesgo.

En el caso de riesgo país se ha optado por aplicar una transformación logarítmica a la serie original, dado que la serie histórica está demasiado influenciada por los valores que se registran durante el período de *default*.

Cálculo de los Indicadores

A continuación se contrastan los indicadores de riesgo construidos hasta el momento. En primer lugar se presenta el índice de riesgo macro social. El gráfico de la izquierda constituye el indicador construido en base a los desvíos respecto a la media y el de la derecha en base a la evolución respecto a los valores extremos.

Gráfico N°87: Indicadores de riesgo sistémico



Fuente: elaboración propia en base a datos del MFCON.

Nótese que se genera un buen ajuste de la historia macroeconómica reciente de la Argentina, ostentando un pico relativo durante la crisis del tequila y un máximo absoluto durante la crisis del 2002. Luego desciende en forma sostenida hasta estabilizarse en los últimos años.

En relación al indicador en función de desvíos, la línea intermedia marca el nivel promedio de todas las series analizadas. Es decir, cuando el indicador se sitúa sobre la línea, denota que todas las variables se ubican exactamente sobre su nivel promedio. Superar el nivel promedio indicaría una situación cada vez más riesgosa y viceversa.