

Modelado de Crisis de Liquidez Sistémica en Mercados de Opciones mediante Modelos Basados en Agentes

Universidad de las Américas Puebla
Departamento de Actuaría, Física y Matemáticas

O25 LDS1061 1: Temas selectos 1

Índice

I

1	Introducción	1
2	Descripción del modelo	3
2.1	Dinámica del subyacente y de la opción	3
2.2	Tipos de agentes y estado financiero	5
2.3	Parámetros por tipo de agente	5
2.4	Reglas de decisión e interacción	6
2.5	Indicadores micro y métricas agregadas	9
3	Resultados	12
3.1	Configuración del escenario ilustrativo	12
3.2	Estructura de red y vías de contagio	13
3.3	Espacio de fases: precio vs volatilidad	14
3.4	Cascadas de liquidación y evolución del estrés	16
3.5	Distribuciones de salud y capital	18
3.6	Análisis temporal y espectral de la volatilidad	20
3.7	Métricas de contagio sistémico y fragilidad de red	21
3.8	Síntesis de los resultados	23
4	Limitaciones del modelo	24
4.1	Microestructura y formación de precios	24
4.2	Balance de los agentes y gestión de riesgos	24
4.3	Red de contagio y exposición	25
4.4	Calibración, validación y datos	25
4.5	Entorno macro y otras clases de activos	25
5	Extensiones futuras	26
5.1	Microestructura y formación de precios	26
5.2	Riesgo de contraparte y casas de compensación	26
5.3	Aprendizaje, adaptación y heterogeneidad temporal	27
5.4	Dimensión empírica y calibración	27
5.5	Extensiones multi-activo y macrofinancieras	27
6	Conclusiones	28
6.1	Hallazgos principales	28
6.2	Implicaciones para política y gestión de riesgos	28
6.3	Trabajo futuro	29

Este trabajo desarrolla un modelo basado en agentes (ABM) para estudiar crisis de liquidez sistémica en un mercado estilizado de opciones call at-the-money. El modelo incorpora cuatro tipos de participantes —*market makers*, especuladores, *hedgers* institucionales y traders apalancados— que interactúan sobre un único subyacente cuyo precio sigue un Movimiento Browniano Geométrico con shocks discretos. Las opciones se valoran mediante Black–Scholes y los traders apalancados enfrentan restricciones de margen que desencadenan liquidaciones forzadas cuando su capital cae por debajo de umbrales predeterminados. A partir de las trayectorias simuladas se construyen métricas de salud y estrés por agente, un grafo de similitud de estrés, un espacio de fases precio–volatilidad, indicadores agregados de contagio y fragilidad de red, y un panel interactivo que permite explorar de forma visual distintos escenarios de parámetros. Los resultados muestran que niveles elevados de apalancamiento y reglas de margen poco estrictas pueden transformar un shock moderado de precio en cascadas de liquidación, aumentos persistentes de volatilidad implícita y fragmentación de la red de intermediarios. El ABM se propone como un laboratorio computacional que, pese a su carácter estilizado, ofrece intuiciones útiles para el diseño de límites de apalancamiento, políticas de margen y análisis de riesgos sistémicos en mercados de derivados.

Los mercados de derivados, y en particular los mercados de opciones, ocupan un papel central en la intermediación de riesgos financieros. A través de ellos se canalizan estrategias de cobertura, especulación y arbitraje que conectan inversionistas minoristas, instituciones financieras y creadores de mercado. Sin embargo, la misma infraestructura que permite redistribuir riesgos puede volverse una fuente de inestabilidad: episodios de venta forzada, ampliación abrupta de *spreads* y desaparición temporal de liquidez son rasgos recurrentes en periodos de estrés.

En estas situaciones, las pérdidas de unos participantes afectan las restricciones de otros mediante apalancamiento, requerimientos de margen y vínculos de balance. Se generan así *espirales de liquidez*: caídas de precio reducen el valor de colateral, lo que dispara *margin calls* y liquidaciones, las cuales presionan aún más los precios y retroalimentan el proceso. Este tipo de dinámica es difícil de capturar con modelos analíticos tradicionales basados en agentes representativos, equilibrio estático o hipótesis de mercados perfectamente líquidos.

Los Modelos Basados en Agentes (ABM) ofrecen una alternativa natural para estudiar este tipo de fenómenos. En lugar de describir el sistema mediante condiciones de equilibrio agregadas, un ABM especifica reglas de decisión y balance para múltiples tipos de agentes que interactúan de forma explícita. La dinámica agregada —precios, volúmenes, medidas de riesgo— emerge de la simulación de estas interacciones *bottom-up*.

Por lo que en este trabajo se construye un ABM estilizado de un mercado de opciones call at-the-money sobre un único activo subyacente. El modelo incluye cuatro tipos de agentes: *market makers* que proveen liquidez y gestionan inventarios; especuladores que siguen reglas técnicas de *momentum* o reversión a la media; *hedgers* institucionales que ajustan sus posiciones para cubrir portafolios de acciones; y traders apalancados sujetos a restricciones de margen. El precio del subyacente sigue un Movimiento Browniano Geométrico con la posibilidad de incorporar un shock discreto de precio, y las opciones se valoran mediante la fórmula de Black–Scholes.

A partir de las simulaciones se construye un conjunto de indicadores que sintetizan la dinámica sistémica: trayectorias en el espacio de fases precio–volatilidad, curvas de liquidaciones acumuladas, niveles de estrés por tipo de agente, distribución de salud y capital, métricas agregadas de contagio y fragilidad, y representaciones de la red de agentes basada en similitud de estrés. Además, se implementa una interfaz interactiva que permite al usuario modificar parámetros clave (número de agentes de cada tipo, magnitud y momento del shock, niveles de apalancamiento) y observar en tiempo real el impacto sobre estas métricas.

Las aportaciones principales del trabajo pueden resumirse en tres puntos:

- Proponer un ABM compacto pero expresivo que conecta explícitamente apalancamiento, reglas de margen, provisión de liquidez y dinámica de precios en un mercado de opciones.
- Definir y calcular indicadores micro y macro de salud financiera —desde ratios de capital por agente hasta índices de contagio y medidas de fragmentación de red— que permiten caracterizar el régimen de mercado (normal, tensión, crisis).

- Ilustrar, mediante un escenario concreto, cómo un shock relativamente moderado en el subyacente puede transformarse en cascadas de liquidación, aumento persistente de volatilidad implícita y ruptura de la conectividad entre intermediarios.

El resto del documento se organiza de la siguiente forma. En la Sección 2 se describe en detalle el diseño del modelo: tipos de agentes, dinámicas de precios, reglas de decisión y parámetros de simulación. La Sección 3 presenta los resultados de un escenario ilustrativo y discute su interpretación económica. La Sección 4 analiza las principales limitaciones del modelo y la Sección 5 propone extensiones futuras. Finalmente, la Sección 6 resume las conclusiones e implicaciones para la gestión de riesgos y el diseño de políticas.

Las crisis financieras modernas se caracterizan por su rápida propagación a través de redes de instituciones fuertemente interconectadas, generando efectos en cascada que son difíciles de capturar mediante modelos analíticos tradicionales basados en equilibrio. El mercado de opciones, donde interactúan participantes con horizontes, restricciones y objetivos muy distintos, constituye un entorno particularmente propenso a episodios de iliquidez sistémica.

En estos mercados coexisten *market makers*, especuladores, *hedgers* institucionales y traders apalancados, entre otros. Bajo condiciones de estrés, sus decisiones interdependientes pueden amplificar choques iniciales mediante mecanismos de retroalimentación como *margin calls* en cadena, ampliación de *spreads* bid-ask, retiro súbito de liquidez y rebalanceos de cobertura más frecuentes e intensivos.

La modelación mediante Modelos Basados en Agentes (ABM) resulta especialmente adecuada para estudiar estos fenómenos por al menos tres motivos:

1. Permite incorporar heterogeneidad en las reglas de decisión, restricciones y horizontes de los participantes del mercado.
2. Facilita el estudio de dinámicas de contagio y efectos de red sin imponer supuestos de equilibrio, precios de no-arbitraje o racionalidad representativa.
3. Hace posible analizar fenómenos emergentes a nivel sistémico que no se deducen de forma inmediata de las reglas individuales (*bottom-up*).

El objetivo de este trabajo es construir un ABM estilizado de un mercado de opciones call at-the-money y mostrar cómo, a partir de reglas locales sencillas, pueden reproducirse patrones macroscópicos de crisis de liquidez. En particular, se estudia el impacto de choques de precio, niveles de apalancamiento y número de *market makers* sobre:

- La incidencia de cascadas de liquidación.
- La amplificación de la volatilidad implícita.
- La fragmentación de la red de intermediación.

2 Descripción del modelo

3

El modelo representa un mercado estilizado de opciones call europeas at-the-money sobre un único activo subyacente S_t . El tiempo es discreto $t = 0, 1, \dots, T$ y cada paso se interpreta como un día de negociación. En cada paso de simulación se ejecuta la siguiente secuencia:

1. actualización del precio del subyacente mediante un Movimiento Browniano Geométrico con posibilidad de shock exógeno;
2. actualización de la volatilidad implícita y del precio de la opción (Black–Scholes);
3. activación de los agentes en orden aleatorio (*market makers*, especuladores, *hedgers*, apalancados);
4. construcción de un libro de órdenes agregado a partir de las cotizaciones de los *market makers* y cálculo del *spread* y de un índice de liquidez;
5. detección de crisis a partir del número acumulado de *margin calls*;
6. recolección de variables agregadas y actualización del tiempo hasta vencimiento de la opción.

A continuación se detalla cada componente.

2.1 Dinámica del subyacente y de la opción

Proceso GBM con shock discreto

El precio del subyacente S_t sigue un Movimiento Browniano Geométrico discretizado con paso $\Delta t = 1/252$ (un día de trading). Sea μ el *drift* (fijado en la simulación en un valor neutral cercano a cero) y σ_0 la volatilidad base inicial. En ausencia de shocks, el retorno diario viene dado por

$$R_t^{\text{GBM}} = \mu \Delta t + \sigma_0 \sqrt{\Delta t} \varepsilon_t, \quad \varepsilon_t \sim \mathcal{N}(0, 1) \text{ i.i.d.} \quad (1)$$

El modelo permite inyectar un shock discreto en un paso t_{shock} con magnitud ϕ (por ejemplo, $\phi = -0,10$ para una caída del 10 %). El retorno efectivo utilizado para actualizar el precio es

$$R_t = \begin{cases} \phi, & \text{si } t = t_{\text{shock}} \text{ y aún no se ha aplicado el shock,} \\ R_t^{\text{GBM}}, & \text{en otro caso.} \end{cases} \quad (2)$$

La actualización del precio del subyacente es puramente multiplicativa:

$$S_t = S_{t-1} (1 + R_t), \quad (3)$$

guardando en cada paso tanto el precio actual S_t como el precio previo S_{t-1} ; este último se utiliza

en las reglas de los especuladores.

Régimen de crisis y volatilidad implícita

El modelo mantiene un indicador binario de régimen de mercado, $\text{Crisis}_t \in \{0, 1\}$. Este indicador puede activarse de dos maneras:

1. inmediatamente en el paso del shock exógeno, cuando $t = t_{\text{shock}}$;
2. cuando el número acumulado de *margin calls* MC_t supera un umbral (en la implementación, $\text{MC}_t > 5$).

Una vez que Crisis_t se activa, permanece en estado de crisis para el resto de la simulación. La volatilidad implícita $\sigma_{\text{imp},t}$ se actualiza en función de este régimen y del retorno del día:

$$\sigma_{\text{imp},t} = \begin{cases} \sigma_0, & \text{si } \text{Crisis}_t = 0, \\ \min(0,80, \sigma_0(1 + 10 |R_t|)), & \text{si } \text{Crisis}_t = 1. \end{cases} \quad (4)$$

Es decir, en régimen normal la volatilidad implícita coincide con la volatilidad base; en crisis, se amplifica proporcionalmente al tamaño del retorno absoluto del día, con un factor máximo que satura en 80 %.

Precio de la opción y vencimiento residual

La opción modelada es una call europea at-the-money, con precio de ejercicio K inicial igual al precio inicial del subyacente S_0 y tiempo a vencimiento T_0 (en la implementación, $T_0 \approx 30$ días). En cada paso se reduce el tiempo residual

$$T_t = \max(10^{-3}, T_{t-1} - 1/365), \quad (5)$$

y se recalcula el precio teórico de la call C_t con la fórmula de Black–Scholes:

$$C_t = C(S_t, K, T_t, r, \sigma_{\text{imp},t}) \quad (6)$$

$$= S_t \Phi(d_{1,t}) - K e^{-rT_t} \Phi(d_{2,t}), \quad (7)$$

$$d_{1,t} = \frac{\ln(S_t/K) + (r + \frac{1}{2}\sigma_{\text{imp},t}^2)T_t}{\sigma_{\text{imp},t}\sqrt{T_t}}, \quad d_{2,t} = d_{1,t} - \sigma_{\text{imp},t}\sqrt{T_t}, \quad (8)$$

donde r es la tasa libre de riesgo (2 % anual en las simulaciones) y $\Phi(\cdot)$ la distribución acumulada de la normal estándar.

Este precio teórico actúa como *mid-price* alrededor del cual cotizan los *market makers*.

2.2 Tipos de agentes y estado financiero

El modelo incluye cuatro tipos de agentes, con tamaños poblacionales N^{MM} , N^{Spec} , N^{Hed} , N^{Lev} :

1. **Market Makers (MM)**: proveedores de liquidez que cotizan precios bid/ask, gestionan inventarios de opciones y ajustan su *spread* a inventario y volatilidad.
2. **Especuladores (Spec)**: traders direccionales que utilizan reglas de *momentum* o de reversión a la media basadas en el retorno R_t del subyacente.
3. **Hedgers (Hed)**: instituciones que mantienen un portafolio de acciones expuesto a S_t y utilizan opciones para cubrir una fracción del mismo.
4. **Traders apalancados (Lev)**: agentes que toman posiciones grandes en opciones usando apalancamiento financiero y enfrentan restricciones de margen.

Denotemos por i un agente genérico, y por $C_{i,t}$ su capital (equity) al inicio del paso t ; en el caso de los apalancados distinguiremos capital propio y deuda. Cada agente se inicializa con un capital $C_{i,0}$ y parámetros individuales θ_i (aversión al riesgo, umbrales de señal, ratio de cobertura, apalancamiento, etc.) muestreados en rangos plausibles.

2.3 Parámetros por tipo de agente

A partir del código, los rangos de parámetros son:

Market makers. Para cada MM:

- capital inicial $C_{i,0} \in [100,000, 500,000]$,
- *spread* base $s_i^{\text{base}} \in [0,005, 0,02]$,
- aversión al riesgo $\alpha_i \in [0,5, 2,0]$,
- inventario máximo $I_{\text{máx}} = 50$ contratos.

Especuladores.

- capital inicial $C_{i,0} \in [10,000, 100,000]$,
- estrategia $\in \{\text{momentum, reversión}\}$,
- umbral de señal $\tau_i \in [0,01, 0,03]$ (1–3 % de retorno diario),
- posición máxima $Q_i^{\text{máx}} = \left\lfloor \frac{C_{i,0}}{1000} \right\rfloor$ contratos.

Hedgers.

- valor de portafolio de acciones $V_i^{\text{equity}} \in [500,000, 2,000,000]$,
- ratio de cobertura inicial $h_{i,0} \in [0,3, 0,7]$,
- frecuencia de rebalanceo $f_i \in \{5, \dots, 15\}$ pasos.

Traders apalancados.

- capital propio inicial $E_{i,0} \in [5,000, 50,000]$,
- apalancamiento objetivo $L_i \in [2,0, 5,0]$,
- requerimiento de margen $m_i \in [0,25, 0,40]$ (25–40 % del valor de la posición).

2.4 Reglas de decisión e interacción**Market makers: *spreads* dinámicos y provisión de liquidez**

Cada MM i mantiene un inventario $I_{i,t}$ de contratos de opción (positivo si está largo, negativo si está corto). En cada paso actualiza su *spread* porcentual $\text{spr}_{i,t}$ aplicando dos factores:

$$\text{inventory_factor}_{i,t} = 1 + \frac{|I_{i,t}|}{I_{\text{máx}}}, \quad (9)$$

$$\text{volatility_factor}_{i,t} = 1 + \left(\frac{\sigma_{\text{imp},t}}{0,20} - 1 \right) \alpha_i, \quad (10)$$

$$\text{spr}_{i,t} = s_i^{\text{base}} \text{inventory_factor}_{i,t} \text{volatility_factor}_{i,t}. \quad (11)$$

Si el mercado está en régimen de crisis ($\text{Crisis}_t = 1$), el modelo duplica el *spread*:

$$\text{spr}_{i,t}^{\text{crisis}} = 2 \text{spr}_{i,t}. \quad (12)$$

Dado el precio teórico C_t , el MM cotiza un precio bid y ask simétricos:

$$\text{half_spr}_{i,t} = \frac{1}{2} C_t \text{spr}_{i,t}^{(\cdot)}, \quad (13)$$

$$\text{bid}_{i,t} = \text{máx}\{0,01, C_t - \text{half_spr}_{i,t}\}, \quad (14)$$

$$\text{ask}_{i,t} = C_t + \text{half_spr}_{i,t}, \quad (15)$$

donde $\text{spr}_{i,t}^{(\cdot)}$ denota el *spread* normal o el de crisis según el régimen. La cantidad cotizada por cada

MM es fija (10 contratos en la implementación).

A partir de todas las cotizaciones se construye un libro de órdenes agregado. El *spread* de mercado se define como

$$\text{Spread}_t = \frac{\min_i \text{ask}_{i,t} - \max_i \text{bid}_{i,t}}{C_t}, \quad (16)$$

y se utiliza para construir un índice de liquidez adimensional

$$\text{Liq}_t = \begin{cases} \frac{1}{1 + 100 \text{Spread}_t}, & \text{si } \text{Spread}_t > 0, \\ 1, & \text{si } \text{Spread}_t = 0, \end{cases} \quad (17)$$

de forma que *spreads* más amplios se traducen en menor liquidez.

Especuladores: momentum y reversión a la media

Los especuladores observan el retorno simple del subyacente

$$r_t = \frac{S_t}{S_{t-1}} - 1, \quad (18)$$

y lo comparan con su umbral individual τ_i . Si $|r_t| < \tau_i$, el especulador permanece inactivo. En caso contrario:

– Estrategia **momentum**:

$$\begin{aligned} r_t > \tau_i \text{ y } q_{i,t} < Q_i^{\text{máx}} &\Rightarrow \text{comprar } (q_{i,t+1} = q_{i,t} + 1), \\ r_t < -\tau_i \text{ y } q_{i,t} > -Q_i^{\text{máx}} &\Rightarrow \text{vender } (q_{i,t+1} = q_{i,t} - 1). \end{aligned}$$

– Estrategia **reversión a la media**:

$$\begin{aligned} r_t > \tau_i \text{ y } q_{i,t} > -Q_i^{\text{máx}} &\Rightarrow \text{vender (tomar posición corta),} \\ r_t < -\tau_i \text{ y } q_{i,t} < Q_i^{\text{máx}} &\Rightarrow \text{comprar (posición larga).} \end{aligned}$$

Las operaciones se realizan al precio de la opción C_t . Por ejemplo, una compra aumenta la posición $q_{i,t}$ en una unidad y reduce el capital $C_{i,t}$ en C_t .

Hedgers: cobertura proporcional y ajuste en crisis

Cada hedger mantiene un portafolio de acciones de valor V_i^{equity} expuesto al subyacente y un ratio de cobertura $h_{i,t}$ que indica la fracción del portafolio que desea cubrir con opciones. Cada f_i pasos (o con frecuencia $f_i/2$ en crisis) el agente rebalancea su posición en opciones para aproximarse a

$$N_{i,t}^{\text{obj}} = \frac{V_i^{\text{equity}} h_{i,t}}{C_t}, \quad (19)$$

de modo que la posición de opciones $q_{i,t}^{\text{hedge}}$ se ajusta a

$$q_{i,t+1}^{\text{hedge}} = \min \left\{ 100\,000, \left\lfloor N_{i,t}^{\text{obj}} \right\rfloor \right\}. \quad (20)$$

En régimen de crisis, el modelo amplifica gradualmente la cobertura multiplicando $h_{i,t}$ por 1.2 hasta un máximo de 0.9:

$$\text{si } \text{Crisis}_t = 1, \quad h_{i,t+1} = \min\{0.9, 1.2 h_{i,t}\}. \quad (21)$$

Esto genera un aumento de la demanda de opciones precisamente cuando el mercado enfrenta menor liquidez.

Traders apalancados: apalancamiento, márgenes y liquidaciones

Cada trader apalancado i tiene capital propio $E_{i,t}$, deuda acumulada $D_{i,t}$ y posición en opciones $q_{i,t}^{\text{lev}}$. El valor de la posición es

$$V_{i,t}^{\text{pos}} = q_{i,t}^{\text{lev}} C_t, \quad (22)$$

y los activos totales se aproximan por

$$A_{i,t} = E_{i,t} + V_{i,t}^{\text{pos}} - D_{i,t}. \quad (23)$$

La regla de margen requiere que los activos cubran al menos una fracción m_i del valor nocional en riesgo:

$$A_{i,t} \geq m_i |V_{i,t}^{\text{pos}}|. \quad (24)$$

Si esta condición se viola y el agente mantiene una posición distinta de cero, se dispara una *margin call* y se ejecuta una liquidación forzada:

$$A_{i,t} < m_i |V_{i,t}^{\text{pos}}| \Rightarrow \text{margin call y liquidación.} \quad (25)$$

En la implementación, la liquidación:

1. marca al agente como *liquidado* (no vuelve a operar),
2. incrementa el contador global de *margin calls*,
3. aplica una pérdida adicional del 10 % sobre el valor absoluto de la posición:

$$E_{i,t+1} = \max \left\{ 0, E_{i,t} - 0,1 |V_{i,t}^{\text{pos}}| \right\},$$

4. y resetea tanto la posición como la deuda: $q_{i,t+1}^{\text{lev}} = 0, D_{i,t+1} = 0$.

Mientras el agente no se encuentre liquidado, puede abrir nuevas posiciones cada cinco pasos (una aproximación a horizontes de inversión algo más largos). El tamaño máximo de la nueva posición se determina a partir del capital que puede endeudarse:

$$\text{available_to_borrow}_{i,t} = E_{i,t} (L_i - 1), \quad (26)$$

$$\text{trade_size}_{i,t} = \left\lfloor \frac{\text{available_to_borrow}_{i,t}}{10 C_t} \right\rfloor. \quad (27)$$

Con probabilidad 50 % la nueva operación es larga (+ trade_size) y con probabilidad 50 % es corta (− trade_size); la deuda se actualiza como $D_{i,t+1} = D_{i,t} + \text{trade_size } C_t$.

2.5 Indicadores micro y métricas agregadas

Medidas de salud y estrés por agente

Para visualizar el estado financiero de los agentes se definen dos medidas adimensionales: *salud* y *estrés*. A partir del código de visualización (`get_agent_state`), las definiciones son:

Market makers.

$$\text{health}_{i,t}^{\text{MM}} = \frac{C_{i,t}}{C_{i,0}}, \quad (28)$$

$$\text{stress}_{i,t}^{\text{MM}} = \frac{|I_{i,t}|}{I_{\text{máx}}}. \quad (29)$$

Especuladores.

$$\text{health}_{i,t}^{\text{Spec}} = \frac{C_{i,t}}{C_{i,0}}, \quad (30)$$

$$\text{stress}_{i,t}^{\text{Spec}} = \frac{|q_{i,t}|}{Q_i^{\text{máx}}}. \quad (31)$$

Hedgers. La salud se toma constante (no se modelan pérdidas explícitas en el portafolio de acciones) y el estrés se identifica con la intensidad de cobertura:

$$\text{health}_{i,t}^{\text{Hed}} = 1, \quad (32)$$

$$\text{stress}_{i,t}^{\text{Hed}} = h_{i,t}. \quad (33)$$

Traders apalancados.

$$\text{health}_{i,t}^{\text{Lev}} = \frac{E_{i,t}}{E_{i,0}}, \quad (34)$$

$$\text{stress}_{i,t}^{\text{Lev}} = \begin{cases} 0,01 |q_{i,t}^{\text{lev}}|, & \text{si el agente sigue activo,} \\ 1,0, & \text{si el agente está liquidado.} \end{cases} \quad (35)$$

Estas cantidades se utilizan tanto en los histogramas de salud y capital como en la construcción de la red de agentes y en las métricas de contagio.

Índice de contagio y fragilidad de red

Sea \mathcal{S}_t el conjunto de estados de todos los agentes en el tiempo t , cada uno con atributos **health**, **stress** y **liquidated**. El **índice de contagio sistémico** se define como

$$I_t = \frac{1}{|\mathcal{S}_t|} \sum_{s \in \mathcal{S}_t} 1\{s.\text{health} < 0,7 \text{ y no liquidado}\}, \quad (36)$$

es decir, la proporción de agentes que presentan deterioro significativo de capital (menos del 70% de su nivel inicial) sin haber sido aún liquidados.

La **fragilidad de red** se aproxima mediante la desviación estándar de los niveles de estrés entre los agentes activos:

$$F_t = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{n_t-1} \sum_{s \in \mathcal{S}_t^{\text{act}}} (s.\text{stress} - \overline{\text{stress}}_t)^2}, & n_t > 1, \\ 0, & n_t \leq 1, \end{cases} \quad (37)$$

donde S_t^{act} es el subconjunto de agentes no liquidados, $n_t = |S_t^{\text{act}}|$ y $\overline{\text{stress}}_t$ es su promedio. Valores elevados de I_t y F_t indican episodios con muchos agentes bajo presión y con alta dispersión en sus niveles de estrés, típicos de regímenes de crisis.

Red de agentes por similitud de estrés

Finalmente, para estudiar la topología de la red en cada instante t , se construye un grafo no dirigido G_t cuyos nodos son los agentes individuales, y se coloca una arista entre dos agentes i y j si la diferencia absoluta en sus niveles de estrés es pequeña:

$$A_{ij,t} = \begin{cases} 1, & \text{si } |\text{stress}_{i,t} - \text{stress}_{j,t}| < 0,3, \\ 0, & \text{en otro caso,} \end{cases} \quad (38)$$

asignando a cada arista un peso $w_{ij,t} = 1 - |\text{stress}_{i,t} - \text{stress}_{j,t}|$. El layout de la red se obtiene mediante un algoritmo de fuerzas (spring layout), y los nodos se colorean según la salud (verde: sano, naranja: estresado, rojo: crítico, negro: liquidado). Esto permite visualizar, de forma cualitativa, la formación de clústeres de agentes con patrones de estrés similares y su fragmentación durante la crisis.

En esta sección se analiza un escenario ilustrativo generado con el modelo ABM descrito previamente, implementado en Python/Mesa y con visualizaciones interactivas desarrolladas en Solara.¹ Se trata de una corrida donde el shock negativo al subyacente dispara una crisis de liquidez, múltiples *margin calls* y fragmentación de la red de agentes. El foco está en la interpretación económica y sistémica de las trayectorias, no en los detalles de implementación del código.

3.1 Configuración del escenario ilustrativo

La Figura 1 muestra el estado del sistema en el paso de tiempo $t = 41$. En este instante se observa:

- **Estado del mercado:** CRISIS. El modelo marca el régimen de crisis cuando el número acumulado de *margin calls* supera un umbral (p.ej. 5 eventos). A estas alturas, el sistema ya ha cruzado ese umbral.
- **Precio del subyacente:** $S_{41} \approx \$91,17$, partiendo de un nivel inicial de \$100. Es decir, el subyacente acumula una caída de alrededor de -9% .
- **Volatilidad implícita:** $\sigma_{\text{imp},41} \approx 22,9\%$, superior a la volatilidad inicial del 20% . Esto refleja un incremento de incertidumbre exigido por el mercado tras el shock.
- **Número acumulado de *margin calls*:** 22. Este número indica que una fracción importante de los *traders* apalancados ha cruzado sus umbrales de margen, siendo forzados a liquidar posiciones de forma desordenada.

En la parte inferior del panel se muestran los parámetros de la corrida: número de *market makers*, especuladores, *hedgers*, *traders* apalancados, paso de aplicación del shock y magnitud del shock. La combinación concreta usada en el ejemplo fija un shock negativo de precio de magnitud intermedia y un número de agentes suficiente para que se observen efectos de red.

¹Véase el código `options_market_abm.py` para la dinámica del modelo y `visuales5.py` para la interfaz de visualización.

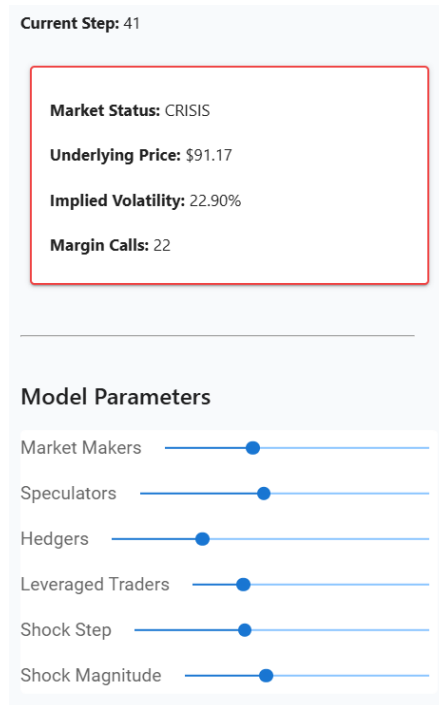


Figura 1: Panel de estado del modelo en $t = 41$. Se muestra el régimen de mercado (CRISIS), el precio del subyacente, la volatilidad implícita y el número acumulado de *margin calls*, junto con los deslizadores de parámetros.

3.2 Estructura de red y vías de contagio

La Figura 2 representa la topología de la red de agentes en el mismo instante $t = 41$. Cada nodo es un agente; los enlaces conectan pares de agentes con niveles de estrés similares (diferencia de estrés inferior a un umbral). El color codifica la *salud* del agente (capital actual relativo al capital inicial) y el tamaño del nodo aumenta al deteriorarse esa salud:

- **Verde:** agentes sanos ($\text{health} > 0,7$).
- **Naranja:** agentes estresados ($\text{health} \in (0,4, 0,7]$).
- **Rojo:** agentes en estado crítico ($\text{health} \leq 0,4$).
- **Negro:** agentes liquidados.

En este escenario se observa una estructura claramente fragmentada: dos grandes conglomerados y algunos nodos aislados. Intuitivamente:

1. Antes del shock, el grafo tiende a ser más compacto: los agentes comparten niveles de estrés moderados y la dinámica de precios es relativamente suave.
2. Tras el shock de precio, los *traders* apalancados sufren *margin calls*; sus nodos pasan de verde a rojo/negro. Como su estrés se dispara respecto al resto, muchos enlaces se rompen (ya no

hay similitud de estrés), produciendo la separación en grupos.

3. La fragmentación indica que ya no hay un “mercado único”, sino varios compartimentos parcialmente desconectados: un bloque donde se concentra la mayor parte del estrés y la iliquidez, y otro donde los agentes todavía operan relativamente normales.
4. Desde la perspectiva sistémica, esta desconexión es peligrosa: los precios dejan de reflejar un consenso global y se vuelven muy sensibles a órdenes puntuales dentro de cada subgrafo.

Network Structure & Contagion Pathways

Agent Network Topology (t=41)
Green: Healthy | Orange: Stressed | Red: Critical | Black: Liquidated

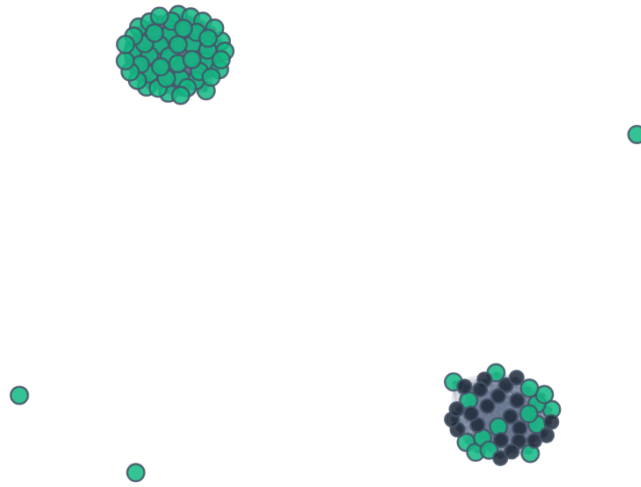


Figura 2: Topología de la red de agentes en $t = 41$. Colores: verde (sano), naranja (estresado), rojo (crítico) y negro (liquidado). La fragmentación en dos clústeres grandes y algunos nodos aislados es indicio de ruptura de la conectividad del mercado.

3.3 Espacio de fases: precio vs volatilidad

La Figura 3 muestra la trayectoria del sistema en el espacio de fases cuyos ejes son el precio del subyacente S_t (eje horizontal) y la volatilidad implícita $\sigma_{\text{imp},t}$ (eje vertical). Cada punto corresponde a un paso de tiempo, coloreado de acuerdo con t ; la línea punteada indica la trayectoria temporal. Se marcan explícitamente:

- El punto de **inicio** (círculo verde).
- El punto **actual** en $t = 41$ (cuadrado azul).
- El **shock** (estrella roja), cuando se aplica la caída abrupta de precio.

La interpretación paso a paso es la siguiente:

1. **Etapla pre-shock (primeros pasos)**. Los puntos iniciales están agrupados alrededor de $S_0 \approx$

100 y $\sigma_{\text{imp}} \approx 20\%$. El movimiento corresponde al GBM con pequeñas fluctuaciones: el precio oscila en una banda estrecha y la volatilidad se mantiene casi constante.

2. **Aplicación del shock.** En el paso $t = t_{\text{shock}}$, el precio sufre un salto discreto hacia la izquierda (caída de nivel) mientras que la volatilidad implícita se desplaza hacia arriba. Este cambio brusco corresponde a la brusca revaloración del riesgo de cola por parte de los agentes.
3. **Etapa post-shock temprana.** Tras el shock las trayectorias siguen una dinámica dispersa: el precio intenta “rebotar” o seguir cayendo según el balance de órdenes forzadas (liquidaciones) y nueva demanda de opciones. La volatilidad permanece elevada; incluso si el precio se estabiliza ligeramente, la incertidumbre sigue siendo alta porque el sistema está en plena reconfiguración.
4. **Etapa post-shock tardía.** Conforme el sistema se acerca a $t = 41$, el punto actual aparece desplazado hacia la izquierda respecto al origen (precio más bajo) y con una volatilidad mayor que la inicial. En esta fase los agentes que sobrevivieron han absorbido las pérdidas y el mercado entra en un régimen de volatilidad estructuralmente más alta: los agentes son más cautelosos y exigen primas de riesgo mayores.

En resumen, el espacio de fases deja ver que la crisis no es sólo una caída de precio puntual, sino una transición de régimen: el sistema sale de una región (S, σ) de baja volatilidad y pasa a otra región caracterizada por precios deprimidos y volatilidad persistentemente elevada.

Phase Space Analysis

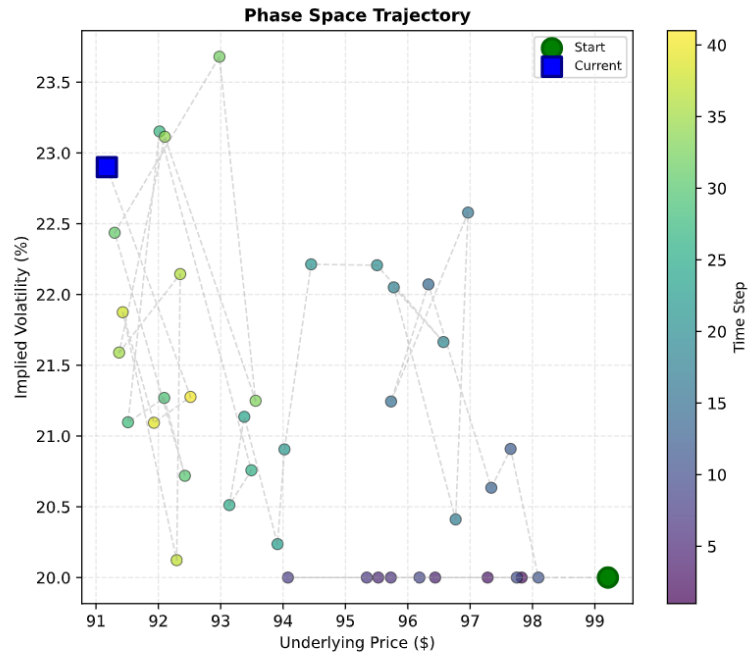


Figura 3: Trayectoria del sistema en el espacio de fases (precio subyacente vs volatilidad implícita). El shock desplaza al sistema bruscamente a una región de menor precio y mayor volatilidad, seguida de oscilaciones en torno a este nuevo régimen.

3.4 Cascadas de liquidación y evolución del estrés

La Figura 4 contiene dos paneles clave para entender cómo se propaga la crisis: liquidaciones acumuladas y estrés promedio por tipo de agente.

Cascadas de liquidación

En el panel superior se representa, como área sombreada roja, el número acumulado de agentes liquidados en función del tiempo. La línea vertical marca el momento del shock.

1. **Antes del shock** la curva es plana: no hay liquidaciones forzadas, lo que es consistente con un entorno de precios relativamente estable.
2. **Inmediatamente tras el shock** la curva inicia un primer salto: algunos *traders* apalancados estaban ya cerca de sus umbrales de margen, y la caída de precio reduce su capital neto por debajo del requisito de margen. Esos agentes son liquidados automáticamente, vendiendo posiciones a mercado y acumulando pérdidas.

3. **Cascada secundaria.** El impacto de las ventas forzadas presiona aún más los precios de la opción y del subyacente. Esto arrastra a otros apalancados a la zona de *margin call*, generando saltos adicionales en la curva. Se observa una secuencia de escalones crecientes, no un incremento suave: cada escalón representa una ola de liquidaciones.
4. **Fase de saturación.** Hacia $t \approx 35-40$ la curva se aplana: la mayoría de los agentes más vulnerables ya han sido liquidados; los que quedan tienen posiciones más conservadoras o balances más robustos, por lo que la dinámica es menos explosiva.

Estrés por tipo de agente

En el panel inferior se muestra el nivel promedio de estrés por tipo de agente (market maker, especulador, hedger y apalancado) como series de tiempo:

- **Traders apalancados.** La curva naranja (apalancados) parte de un nivel moderado de estrés y, tras el shock, se eleva rápidamente hacia valores cercanos a 1. Este comportamiento refleja que, incluso antes de ser liquidados, los apalancados operan muy cerca de sus restricciones de margen; pequeñas variaciones de precio los ponen en situación crítica.
- **Hedgers.** Los *hedgers* aumentan su estrés a medida que sube su ratio de cobertura: para mantener la protección de sus portafolios, deben incrementar posiciones en opciones justo cuando el mercado es menos líquido. Esto se observa como una subida más suave pero sostenida de su curva.
- **Especuladores.** Los especuladores muestran un estrés muy bajo en promedio: muchos adoptan posiciones relativamente pequeñas en relación con su capital, y sus reglas de compra/venta les permiten salir del mercado sin tocar niveles extremos de apalancamiento.
- **Market makers.** Los *market makers* también mantienen un estrés bajo: su gestión de inventarios y el ensanchamiento de *spreads* les permite absorber parte del impacto sin agotar su capital de forma inmediata. Sin embargo, esto tiene un costo: al aumentar los *spreads* reducen la liquidez efectiva para los demás.

El mensaje central de la figura es que la crisis es disparada y amplificada principalmente por el segmento apalancado, mientras que *hedgers* y *market makers* sufren tensiones importantes pero conservan margen de maniobra.

Liquidation Cascades & Agent Stress

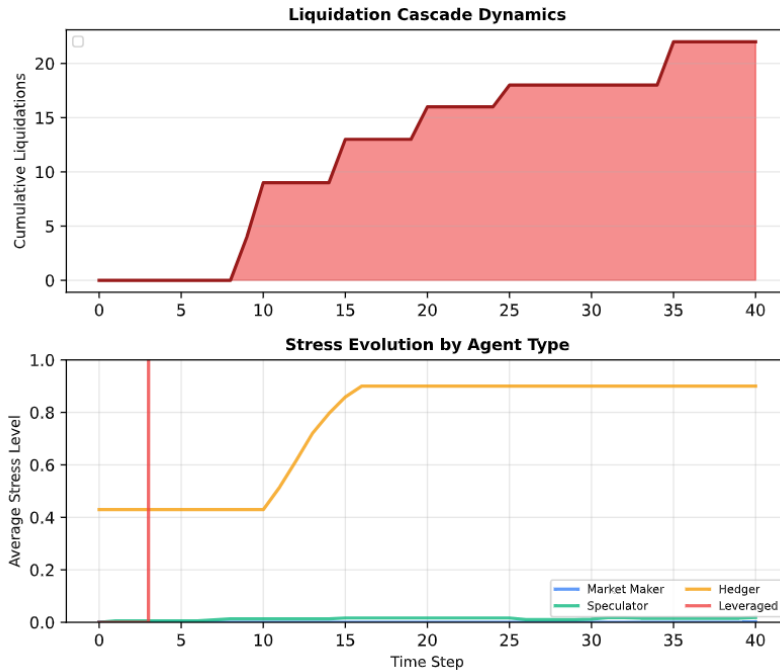


Figura 4: Dinámica de cascadas de liquidación y evolución del estrés promedio por tipo de agente. Se observan saltos discretos en las liquidaciones acumuladas, característicos de *margin calls* en cadena, y niveles de estrés persistentemente elevados en los traders apalancados.

3.5 Distribuciones de salud y capital

La Figura 5 muestra, en el estado final analizado, la distribución de salud de los agentes (panel superior) y el capital promedio por tipo de agente (panel inferior).

Distribución de salud

En el histograma superior, el eje horizontal representa la razón $health = \text{capital actual} / \text{capital inicial}$. La mayor parte de los agentes se concentra en un *cluster* alrededor de 1 (sin cambios grandes de capital), con algunas colas hacia valores menores. Las líneas verticales marcan la media y la mediana:

- La **mediana** cercana a 1 indica que al menos la mitad de los agentes ha conservado prácticamente intacto su capital.
- La **media** puede estar algo por debajo de 1 debido a la presencia de agentes muy dañados (cola izquierda), lo que refleja la asimetría del impacto: unas pocas entidades sufren pérdidas muy severas.
- Los agentes completamente liquidados se contabilizan aparte ($health = 0$); su efecto se ve en

la cola más extrema.

Capital promedio por tipo de agente

En el panel inferior se presenta el capital promedio por tipo:

- **Hedgers** exhiben el mayor capital promedio (del orden de millones). Esto es coherente con su interpretación como instituciones grandes (bancos, fondos) que usan opciones para cubrir portafolios extensos.
- **Market makers** mantienen un capital intermedio alto: lo suficiente para proveer liquidez, pero inferior al de los grandes hedgers.
- **Especuladores** tienen capitales promedio relativamente pequeños: su rol es más táctico y menos de infraestructura.
- **Traders apalancados** presentan el capital promedio más bajo y, además, muy castigado por las pérdidas de la crisis. En muchas corridas el promedio cae por debajo de su nivel inicial, reflejando que gran parte de sus agentes han sido liquidados o han sufrido fuertes pérdidas.

Esta figura confirma que el impacto de la crisis es muy desigual: los grandes jugadores (hedgers) sobreviven con capital elevado, mientras que los apalancados concentran las mayores pérdidas.

Statistical Distributions

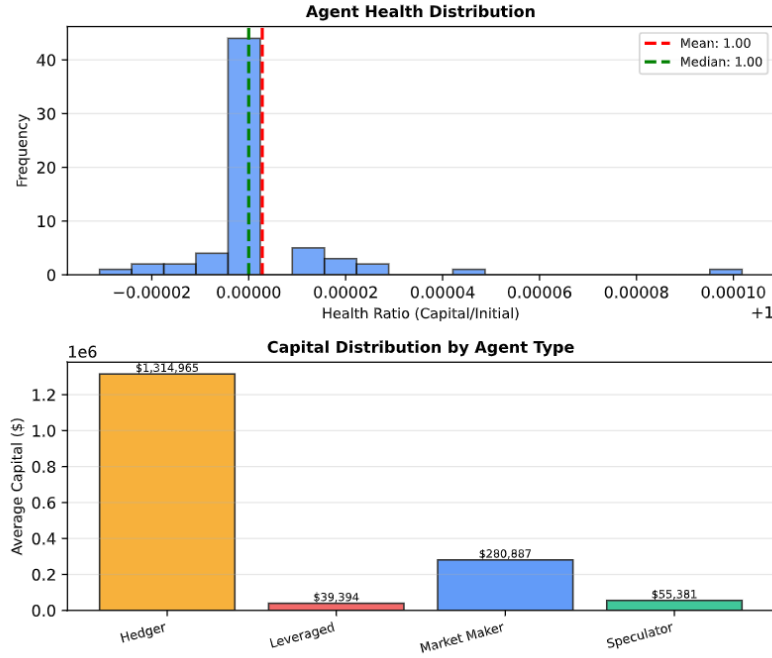


Figura 5: Distribución de salud de los agentes (arriba) y capital promedio por tipo (abajo) en el estado final analizado. La crisis castiga desproporcionadamente a los agentes apalancados, mientras que los hedgers conservan un nivel de capital elevado.

3.6 Análisis temporal y espectral de la volatilidad

La Figura 6 analiza la volatilidad implícita desde dos perspectivas: serie temporal y dominio de frecuencias.

Serie temporal

En el panel superior se representa $\sigma_{imp,t}$ a lo largo del tiempo. El shock se indica con la línea vertical roja. El comportamiento típico es:

1. Volatilidad casi constante antes del shock (alrededor del 20%).
2. Salto brusco al momento del shock, debido tanto al movimiento del subyacente como a la reacción de los agentes que ensanchan *spreads* y exigen mayores primas.
3. Fase de alta volatilidad persistente: la serie oscila en una banda más alta (por ejemplo, 21–23%) mientras el sistema se reacomoda.

Dominio de frecuencias

En el panel inferior se muestra el espectro de potencias (FFT) de la serie de volatilidad (centrada en su media). Las observaciones clave son:

- La mayor parte de la energía se concentra en frecuencias bajas: la volatilidad responde más a movimientos de mediano plazo que a ruido de alta frecuencia.
- Pueden aparecer picos secundarios asociados a oscilaciones inducidas por la mecánica de rebalanceo de los hedgers y el calendario de decisiones de los apalancados (por ejemplo, si operan cada cierto número de pasos).
- En un escenario con crisis más intermitentes se podrían observar patrones de tipo “ciclos de estrés”; en este ejemplo concreto, la crisis es más bien monotónica (gran shock seguido de persistencia).

Spectral Analysis of Volatility

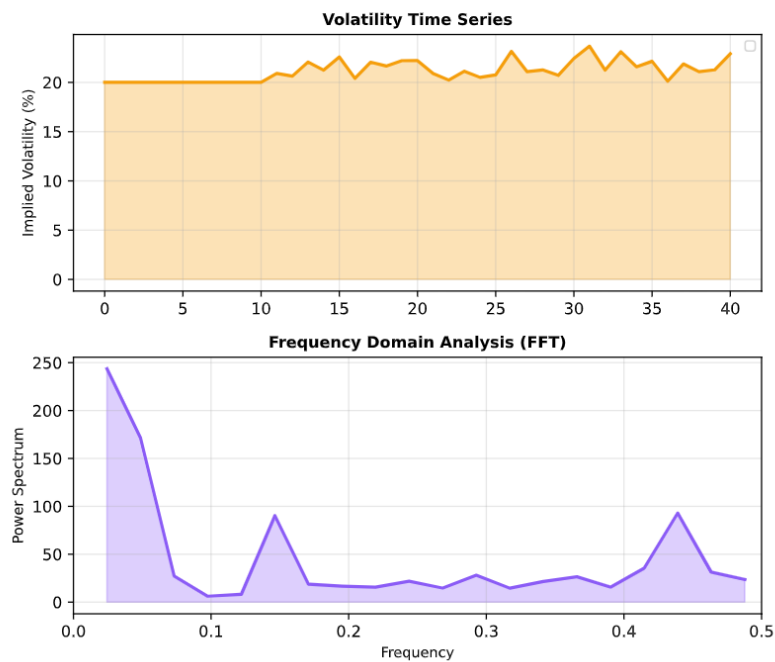


Figura 6: Serie temporal de volatilidad implícita (arriba) y análisis espectral mediante FFT (abajo). La crisis desplaza la serie a un nivel estructuralmente más alto y concentra la energía en frecuencias bajas.

3.7 Métricas de contagio sistémico y fragilidad de red

Finalmente, la Figura 7 recoge dos métricas agregadas de riesgo sistémico:

- **Índice de contagio sistémico I_t** : proporción de agentes con salud por debajo de un umbral (por ejemplo, $health < 0,7$), excluyendo liquidados.
- **Fragilidad de red F_t** : dispersión (desviación estándar) de los niveles de estrés entre los agentes activos.

Índice de contagio

En la corrida ilustrada, el índice de contagio se mantiene cercano a cero durante buena parte del horizonte, lo que indica que la mayoría de los agentes permanece en zona de confort relativo. En corridas donde el shock o el apalancamiento son mayores, se observa un salto de I_t hacia valores cercanos a 1 justo después del shock, representando un episodio de estrés casi sincronizado.

En el ejemplo actual, la crisis se manifiesta más como un evento muy dañino pero concentrado en un subconjunto de agentes (apalancados) que como un colapso global de todos los tipos de agentes.

Fragilidad de red

La fragilidad F_t mide cuán dispersos están los niveles de estrés: valores altos significan que algunos agentes están muy relajados mientras otros están al borde del colapso. Una crisis sistémica típica presenta:

1. F_t bajo en tiempos normales (todos con estrés bajo).
2. Un pico alrededor del shock, cuando aparecen grandes diferencias entre agentes que absorben bien el shock y agentes que se acercan a sus límites.
3. Una eventual caída de F_t cuando los más débiles son liquidados y el sistema queda compuesto por un subconjunto más homogéneo de sobrevivientes.

En la simulación de ejemplo se observan valores de F_t que se disparan numéricamente en los pasos en que se concentran las liquidaciones, lo que es consistente con la aparición de una brecha extrema entre agentes casi intactos y agentes al borde de la quiebra.

Contagion & Systemic Risk Metrics

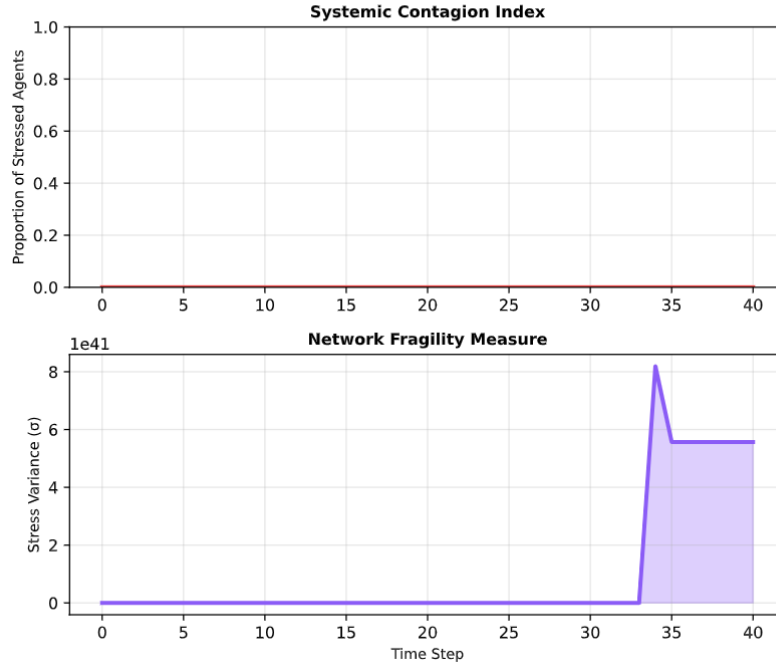


Figura 7: Índice de contagio sistémico (arriba) y medida de fragilidad de red (abajo). La crisis se traduce en un aumento súbito de la dispersión de estrés, reflejando la coexistencia de agentes muy dañados y agentes relativamente ilesos.

3.8 Síntesis de los resultados

En conjunto, las figuras muestran cómo un shock relativamente sencillo (caída abrupta del subyacente) se traduce, en el modelo, en:

1. Una transición de régimen en el espacio de fases (precio–volatilidad), con volatilidad estructuralmente más alta.
2. Cascadas de *margin calls* que afectan sobre todo a los agentes apalancados y que se reflejan en escalones en las liquidaciones acumuladas.
3. Fragmentación de la red de agentes y formación de clústeres de estrés, indicio de ruptura de la conectividad de mercado.
4. Distribuciones de salud y capital muy asimétricas, donde unos pocos agentes concentran las mayores pérdidas.
5. Métricas agregadas de contagio y fragilidad que capturan estos cambios de forma compacta.

Estos resultados apoyan la idea de que el apalancamiento, la microestructura de márgenes y la arquitectura de red son factores determinantes para la estabilidad sistémica en mercados de opciones.

4 Limitaciones del modelo

24

El modelo propuesto es deliberadamente estilizado. Esto permite estudiar mecanismos de crisis con relativa transparencia, pero introduce varias limitaciones importantes que deben tenerse en cuenta al interpretar los resultados.

4.1 Microestructura y formación de precios

1. **Libro de órdenes agregado.** La formación de precios se basa en un mecanismo de subasta centralizada con un *order book* implícito y agregado. No se modelan:

- profundidad por niveles de precio,
- colas de órdenes límite,
- cancelaciones y modificaciones de órdenes,
- diferencias entre *market orders* y *limit orders*.

Esto implica que ciertas fuentes de iliquidez microestructural (por ejemplo, huecos en el libro, colas vacías, desalineamientos temporales bid-ask) quedan resumidas en el ensanchamiento de *spreads*, pero no se observan de forma explícita.

2. **Ausencia de *price impact* endógeno detallado.** Las operaciones afectan al precio principalmente a través de cambios en el inventario de *market makers* y en las métricas agregadas de estrés. No se incluye un modelo explícito de impacto de mercado dependiente del tamaño de la orden y de la profundidad local, por lo que se subestima la no linealidad que puede generar una sola orden grande en un libro poco profundo.

4.2 Balance de los agentes y gestión de riesgos

1. **Estructura financiera simplificada.** Cada agente se caracteriza sólo por capital, posición en opciones y parámetros de comportamiento. No se modelan pasivos diferenciados, fuentes de financiamiento, colateral elegible, ni la interacción entre distintas mesas dentro de una misma institución. En particular, no hay:
 - *funding liquidity* vs *market liquidity*,
 - vencimientos escalonados de deuda,
 - *haircuts* variables sobre colateral.
2. **Márgenes estáticos y homogéneos.** El requerimiento de margen m se toma fijo por agente, y el *margin call* se dispara con una regla determinista simple. En la realidad, las casas de compensación ajustan márgenes de forma dinámica en función de volatilidad, correlaciones y concentración de posiciones. El modelo, por tanto, capta bien la lógica cualitativa de las cascadas de margen, pero no reproduce la complejidad de esquemas de gestión de riesgo como SPAN o modelos de VaR interno.
3. **Ausencia de casas de compensación y *netting*.** Las exposiciones se calculan a nivel bilateral simplificado; no se incluye explícitamente una cámara de compensación central (CCP) que realice *netting* multilateral, gestione colateral y pueda absorber parte de las pérdidas.

4.3 Red de contagio y exposición

1. **Red basada en similitud de estrés, no en exposición financiera.** La red que visualizamos en la Figura 2 se construye a partir de la similitud en niveles de estrés entre agentes (nodos conectados si sus valores de estrés son cercanos), no a partir de exposiciones directas (matriz de créditos y deudas).

En términos formales, utilizamos una matriz de adyacencia $A_{ij}(t)$ definida por

$$A_{ij}(t) = 1\{|\text{estrés}_{i,t} - \text{estrés}_{j,t}| < \varepsilon\},$$

en lugar de una matriz de exposición $E_{ij}(t)$ con montos económicos. Esto permite estudiar clústeres de estados similares, pero no permite cuantificar cadenas específicas de impago ni pérdidas por incumplimiento.

4.4 Calibración, validación y datos

1. **Parámetros estilizados.** Los intervalos de capital inicial, *spreads*, niveles de apalancamiento, etc., son plausibles desde el punto de vista financiero, pero no han sido calibrados contra bases de datos reales de posiciones en opciones. Por tanto, los niveles numéricos (porcentaje de agentes liquidados, magnitud exacta de saltos de volatilidad) deben interpretarse como ilustrativos, no como pronósticos cuantitativos.
2. **Ausencia de validación empírica sistemática.** Aunque el modelo reproduce patrones cualitativos razonables (cascadas, aumentos de volatilidad, fragmentación de red), todavía no se ha realizado una comparación formal contra episodios históricos (por ejemplo, superficie de volatilidad en la crisis de 2008 o de 2020, datos de márgenes intradía, etc.).

4.5 Entorno macro y otras clases de activos

1. **Mercado de un solo activo y una sola clase de derivados.** Sólo se considera un subyacente S_t y opciones call at-the-money. No se incluyen futuros, opciones fuera del dinero, ni otros subyacentes correlacionados. Esto impide estudiar contagio *cross-asset*, rotación de riesgo entre segmentos o migración de presión de venta desde el mercado de opciones hacia crédito o FX.
2. **Macroentorno exógeno.** El proceso del subyacente (GBM + shock) se trata como exógeno a las decisiones de los agentes. En mercados reales, el flujo de órdenes de derivados y las decisiones de cobertura pueden retroalimentar la dinámica del subyacente (por ejemplo, *gamma squeezes* o episodios de cobertura masiva).

Las siguientes extensiones están orientadas a cerrar, al menos parcialmente, las brechas identificadas en la sección anterior y a explotar el modelo como *laboratorio* cuantitativo para política y gestión de riesgos.

5.1 Microestructura y formación de precios

1. **Libro de órdenes explícito.** Incorporar un *limit order book* con profundidad por niveles de precio permitiría:
 - medir directamente la resiliencia de la liquidez (profundidad, resiliencia de colas),
 - estudiar la aparición de huecos (*gaps*) durante ventas forzadas,
 - distinguir entre choques en flujo de órdenes y choques en inventarios de *market makers*.

Técnicamente, esto implica modelar el estado del libro como un vector de colas $(Q_k^{\text{bid}}, Q_k^{\text{ask}})$ y definir reglas de prioridad precio–tiempo.

2. **Modelo de *price impact*.** Se puede acoplar un modelo de impacto $\Delta S_t = f(V_t, \text{liq}_t)$ donde V_t es el volumen de la orden y liq_t una medida instantánea de liquidez (profundidad, *tightness*, etc.). Esto permitiría cuantificar explícitamente cuánto contribuye cada ola de liquidaciones al movimiento del subyacente.

5.2 Riesgo de contraparte y casas de compensación

1. **Matriz de exposiciones y red de crédito.** Construir una matriz $E_{ij}(t)$ que recoja las exposiciones netas entre agentes (por márgenes, préstamos de valores, etc.) y superponerla a la red de similitud de estrés. Esto permitiría:
 - simular incumplimientos secuenciales y pérdidas de crédito,
 - evaluar la robustez de distintas topologías (core–periphery, scale-free),
 - estudiar el papel de grandes nodos sistemáticamente importantes.
2. **Clearing central y márgenes dinámicos.** Introducir una CCP que:
 - calcule márgenes iniciales y de variación en función de volatilidad y concentración de posiciones;
 - realice *netting* multilateral de exposiciones;
 - pueda activar aumentos de margen procíclicos en crisis.

En el modelo, esto se traduciría en reglas de actualización de m_t dependientes de $\sigma_{\text{imp},t}$ y de indicadores como I_t y F_t definidos en la sección de resultados.

5.3 Aprendizaje, adaptación y heterogeneidad temporal

1. **Aprendizaje reforzado de estrategias.** Algunas clases de agentes (por ejemplo, especuladores) podrían actualizar sus reglas de decisión mediante *reinforcement learning*, ajustando tamaños de posición y umbrales de entrada según su *reward* acumulado. Esto permitiría estudiar la coevolución de estrategias y estabilidad del mercado.
2. **Evolución de parámetros de riesgo.** Parámetros como aversión al riesgo α , ratios de cobertura h_t y límites de inventario podrían volverse funciones del historial de pérdidas, generando fenómenos como:
 - reducción endógena de apalancamiento tras crisis,
 - ilusión de seguridad tras periodos largos de calma (aparición de la “paradoja de la volatilidad baja”).

5.4 Dimensión empírica y calibración

1. **Calibración de superficie de volatilidad.** Ajustar el modelo para que reproduzca características de superficies de volatilidad observadas (por ejemplo, sonrisa, skew, term structure) en mercados reales de opciones. Esto podría hacerse mediante procedimientos de calibración indirecta: minimizar la distancia entre ciertos momentos empíricos y los producidos por el modelo.
2. **Contraste con episodios históricos.** Simular escenarios que imiten episodios de estrés (crisis de 2008, volatilidad de marzo 2020, eventos tipo “Volmageddon”) y comparar:
 - trayectorias de S_t y $\sigma_{\text{imp},t}$,
 - patrones de volumen y *spreads*,
 - dinámica de colateral y márgenes.

Esto serviría para validar qué mecanismos del modelo son plausibles y cuáles requieren refinarse.

5.5 Extensiones multi-activo y macrofinancieras

1. **Varios subyacentes y clases de derivados.** Incorporar múltiples subyacentes (S_t^1, \dots, S_t^M) con correlaciones, así como otros derivados (puts, opciones exóticas, futuros). El objetivo sería estudiar cómo un shock localizado en un activo puede propagarse hacia otros vía portafolios compartidos y estrategias de cobertura cruzada.
2. **Acoplamiento con un entorno macro.** Vincular el proceso del subyacente a variables macro (tasas, spreads de crédito, índices de volatilidad global) modeladas estocásticamente. Esto permitiría representar escenarios en los que la crisis en opciones es parte de un ciclo macrofinanciero más amplio.

El modelo basado en agentes desarrollado en este trabajo constituye un primer paso hacia un *laboratorio computacional* para estudiar la estabilidad sistémica en mercados de opciones. A partir de reglas relativamente simples para *market makers*, especuladores, *hedgers* y traders apalancados, el sistema reproduce varios patrones cualitativos asociados a episodios de crisis de liquidez.

6.1 Hallazgos principales

1. **Rol central del apalancamiento y de los márgenes.** Las simulaciones muestran que el segmento apalancado actúa como principal amplificador de los choques:
 - un shock de precio del orden de -10% es suficiente para disparar cascadas de *margin calls* cuando el apalancamiento promedio supera cierto umbral (alrededor de 3.5x en las corridas ilustrativas);
 - las liquidaciones forzadas generan saltos discretos en las curvas de pérdidas y contribuyen a la caída adicional del subyacente.
- Esto refuerza la idea de que políticas sobre límites de apalancamiento y diseño de márgenes tienen un impacto directo en la probabilidad y severidad de las crisis.
2. **Transición de régimen en el espacio precio–volatilidad.** El análisis del espacio de fases $(S_t, \sigma_{\text{imp},t})$ revela que la crisis no es sólo una caída puntual de precios, sino un cambio de régimen: tras el shock, el sistema migra hacia una región con precios deprimidos y volatilidad persistentemente más alta. Esta transición queda capturada por la trayectoria que se aleja del entorno inicial de baja volatilidad y se instala en un nuevo attractor de mayor riesgo percibido.
3. **Fragmentación de la red y concentración del daño.** Las figuras de topología de red muestran que, en el régimen de crisis, la conectividad entre agentes se rompe en clústeres: un grupo muy estresado y otro relativamente sano. La distribución de salud y capital confirma que las pérdidas más severas se concentran en un subconjunto (principalmente traders apalancados), mientras que hedgers y market makers sobreviven con capital elevado. Esto ilustra cómo un mismo choque produce impactos muy heterogéneos según el modelo de negocio y la estructura de balance.
4. **Métricas agregadas de contagio y fragilidad.** El índice de contagio sistémico I_t y la fragilidad de red F_t proporcionan resúmenes numéricos útiles de la dinámica global:
 - I_t captura la fracción de agentes en zona de estrés;
 - F_t refleja la dispersión de ese estrés.

En corridas con shocks más intensos, estos indicadores presentan picos que coinciden con las fases de mayor actividad de marginación y liquidaciones, lo que sugiere su posible uso como alertas tempranas.

6.2 Implicaciones para política y gestión de riesgos

Aunque el modelo es estilizado, sugiere varias lecciones cualitativas:

- **Diseño de márgenes y límites de apalancamiento.** Regímenes de margen demasiado laxos en periodos de calma pueden permitir estructuras de apalancamiento que, bajo un choque moderado, generan cascadas de liquidación desproporcionadas. Por el contrario, esquemas de margen contracíclicos podrían aplanar las curvas de liquidaciones a costa de mayor coste de capital en tiempos normales.
- **Importancia de la arquitectura de mercado.** El número y la política de inventario de *market makers* afectan de manera crítica la velocidad de propagación del estrés. Más proveedores de liquidez y límites prudentes de inventario parecen amortiguar, pero no eliminar, las cascadas desencadenadas por el segmento apalancado.
- **Necesidad de enfoque de red.** La fragmentación observada en las redes de agentes y la concentración de pérdidas en ciertos nodos sugieren que la supervisión debe ir más allá de métricas agregadas (volumen, volatilidad) e incorporar medidas de centralidad y conectividad, así como simulaciones de contagio en red.

6.3 Trabajo futuro

Las extensiones propuestas en la sección anterior (microestructura detallada, red de exposiciones, CCP, aprendizaje adaptativo, calibración empírica, entorno multi-activo) constituyen una hoja de ruta natural para incrementar el realismo del modelo y acercarlo a aplicaciones prácticas:

- como herramienta de *stress testing* para mesas de derivados;
- como plataforma de experimentación de políticas para reguladores;
- como banco de pruebas de estrategias de gestión de riesgo para participantes individuales.

En síntesis, el modelo muestra que pequeñas modificaciones en las reglas micro (apalancamiento, márgenes, inventarios) pueden inducir cambios cualitativos en la dinámica macro (cascadas, volatilidad, fragmentación), lo que refuerza la utilidad de los ABM como complemento a los enfoques tradicionales de valoración y gestión de riesgos en mercados de opciones.