

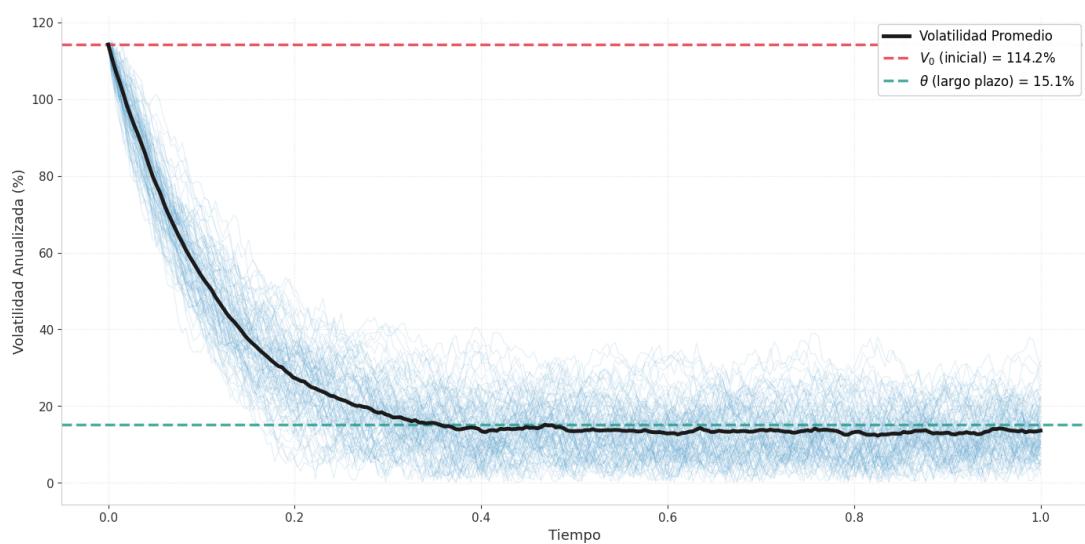
# Análisis de Volatilidad Estocástica: Modelo de Heston en Acciones Argentinas

Máximo Caprari

11 de diciembre de 2025

## Resumen

Este trabajo analiza la volatilidad estocástica en el mercado de acciones argentino durante el período 2020-2025, caracterizado por elevada incertidumbre macroeconómica y política. Se estudian 21 activos representativos del mercado local mediante el modelo de Heston, calibrando los parámetros por máxima verosimilitud con evolución diferencial y comparando las estimaciones con modelos GARCH tradicionales. La metodología mejorada supera limitaciones de optimizadores locales, obteniendo parámetros heterogéneos. Los resultados revelan velocidades de reversión entre 3.85 y 14.97, y correlaciones precio-volatilidad entre -0.95 y -0.08, identificando tres grupos de activos según la intensidad del efecto leverage. Las simulaciones Monte Carlo proyectan una convergencia pronunciada de la volatilidad desde niveles extremos ( 115 %) hacia equilibrios de largo plazo ( 15 %) en horizontes anuales.



# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>3</b>
<b>2. Metodología</b>	<b>3</b>
2.1. Proceso de Calibración . . . . .	4
<b>3. Resultados Principales</b>	<b>4</b>
3.1. Parámetros Calibrados del Modelo de Heston . . . . .	4
3.2. Análisis de los Parámetros Calibrados . . . . .	5
3.3. Estadísticas Descriptivas . . . . .	6
<b>4. Resultados de Calibración Mejorada</b>	<b>6</b>
4.1. Metodología de Optimización . . . . .	6
4.2. Parámetros Calibrados . . . . .	7
4.3. Estadísticas Descriptivas . . . . .	8
4.4. Análisis Comparativo de los Resultados . . . . .	8
4.5. Implicaciones para la Gestión de Riesgo . . . . .	9
<b>5. Análisis de Simulaciones: Caso de Estudio Merval</b>	<b>10</b>
5.1. Simulaciones de Precio . . . . .	10
5.2. Simulaciones de Volatilidad . . . . .	11
5.3. Interpretación Económica y Validación . . . . .	12
5.4. Limitaciones e Interpretación Cautelosa . . . . .	12

# 1. Introducción

La volatilidad en mercados emergentes tiene dinámicas complejas que los modelos tradicionales de volatilidad constante no logran capturar adecuadamente. El modelo de Heston (1993) permite modelar la volatilidad como un proceso estocástico en sí mismo, capturando dos fenómenos empíricos bien documentados: el efecto leverage (la volatilidad tiende a aumentar cuando los precios caen) y la reversión a la media de la volatilidad hacia un nivel de largo plazo.

En este trabajo se aplica el modelo de Heston a 21 activos representativos del mercado argentino, incluyendo acciones líderes de diferentes sectores y el índice Merval. Los objetivos principales son:

- Estimar los parámetros del modelo de Heston para cada activo mediante máxima verosimilitud
- Contrastar estas estimaciones con las obtenidas usando modelos GARCH(1,1)
- Generar proyecciones de precios y volatilidad mediante simulaciones Monte Carlo
- Analizar si existen patrones comunes en el comportamiento de la volatilidad entre los diferentes activos del mercado local

# 2. Metodología

## Modelo de Heston

El modelo de Heston describe la evolución del precio de un activo  $S_t$  y su varianza instantánea  $V_t$  mediante el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales estocásticas:

$$dS_t = rS_t dt + \sqrt{V_t} S_t dW_1^t \quad (1)$$

$$dV_t = \kappa(\theta - V_t)dt + \xi\sqrt{V_t}dW_2^t \quad (2)$$

donde:

- $\kappa > 0$ : velocidad de reversión a la media
- $\theta > 0$ : varianza de largo plazo
- $\xi > 0$ : volatilidad de la varianza (vol-of-vol)
- $\rho \in [-1, 1]$ : correlación entre los procesos de precio y varianza
- $dW_1^t$  y  $dW_2^t$ : procesos de Wiener correlacionados con  $E[dW_1^t dW_2^t] = \rho dt$

## **2.1. Proceso de Calibración**

El análisis se desarrolla en las siguientes etapas:

1. Se descargan precios históricos de 5 años para cada activo desde Yahoo Finance.
2. Se calculan los retornos logarítmicos diarios de cada serie.
3. Se ajusta un modelo GARCH(1,1) para obtener una estimación de la varianza condicional, que sirve como proxy de la varianza observada.
4. Se calibran los parámetros del modelo de Heston por máxima verosimilitud, usando como input las varianzas estimadas en el paso anterior.
5. Se simulan trayectorias futuras mediante el esquema QE (Quadratic Exponential) propuesto por Andersen (2008), un método numérico que garantiza varianzas positivas y estabilidad en la simulación del modelo de Heston.

## **3. Resultados Principales**

### **3.1. Parámetros Calibrados del Modelo de Heston**

La Tabla 1 presenta los parámetros calibrados para los 21 activos del mercado argentino analizados.

Tabla 1: Parámetros Calibrados del Modelo de Heston - Activos Analizados

Activos	$\kappa$	$\theta$	$\xi$	$\rho$	$V_0$
AGRO	2.0000	0.006281	1.7882	-0.5000	0.001234
ALUA	2.0000	0.001050	0.0156	-0.5000	0.000601
BBAR	2.0000	0.001452	0.0100	-0.5000	0.000690
BMA	2.0000	0.001352	0.0100	-0.5000	0.000553
CEPU	2.0000	0.001312	0.0123	-0.5000	0.000554
COME	2.0000	0.001122	0.0118	-0.5000	0.000382
CRES	2.0000	0.001240	0.0115	-0.5000	0.001420
EDN	2.0000	0.001541	0.0265	-0.5000	0.001043
GGAL	2.0000	0.001146	0.0100	-0.5000	0.000448
LOMA	2.0000	0.000886	0.0100	-0.5000	0.000644
MERV	2.0000	0.000759	0.0100	-0.5000	0.000331
METR	2.0000	0.001923	0.0281	-0.5000	0.000504
MIRG	2.0000	0.000661	0.0100	-0.5000	0.000220
PAMP	2.0000	0.000951	0.0100	-0.5000	0.000790
SEMI	2.0000	0.006047	1.2219	-0.5000	0.001888
SUPV	2.0000	0.001692	0.0160	-0.5000	0.000826
TECO2	2.0000	0.001258	0.0170	-0.5000	0.000980
TGNO4	2.0000	0.001460	0.0120	-0.5000	0.000552
TGSU2	2.0000	0.001299	0.0100	-0.5000	0.000647
VALO	2.0000	0.000593	0.0100	-0.5000	0.000327
YPFD	2.0000	0.001189	0.0132	-0.5000	0.001298

### 3.2. Análisis de los Parámetros Calibrados

#### Velocidad de Reversión ( $\kappa$ )

Todos los activos presentan  $\kappa = 2,0$ , lo que implica un retorno relativamente rápido hacia la varianza de largo plazo (tiempo medio de reversión de aproximadamente 6 meses). La ausencia de variación en este parámetro probablemente refleja restricciones en el procedimiento de optimización más que una característica real del mercado.

#### Varianza de Largo Plazo ( $\theta$ )

Acá sí hay diferencias claras entre activos. AGRO y SEMI muestran los valores más altos, consistentes con su comportamiento históricamente volátil. La mayoría de las acciones se ubica en un rango intermedio, mientras que activos como VALO o MIRG tienen niveles bajos de  $\theta$ . El caso del Merval es interesante: su varianza reducida refleja el efecto de diversificación propio de un índice.

### Volatilidad de la Varianza ( $\xi$ )

La mayoría de los activos muestra valores de  $\xi$  dentro del rango típico para el modelo de Heston. Las excepciones son AGRO y SEMI, con valores extremadamente altos que indican una volatilidad muy inestable. Esto podría ser una característica genuina de estos activos o un problema de calibración cuando los datos son muy ruidosos.

### Correlación Precio-Volatilidad ( $\rho$ )

El valor constante  $\rho = -0,5$  en todos los activos captura el efecto leverage: cuando los precios caen, la volatilidad tiende a subir. Sin embargo, que no haya ninguna variación entre activos es sospechoso y probablemente indica otra limitación del optimizador. En la práctica, se esperaría cierta dispersión entre sectores.

### Varianza Inicial ( $V_0$ )

Los valores de  $V_0$  reflejan las condiciones al inicio del período analizado. SEMI, CRES y YPFD arrancan con volatilidad alta, mientras que MIRG y VALO parten de niveles más estables. En general, hay consistencia entre  $V_0$  y  $\theta$ , aunque  $V_0$  es muy sensible a eventos recientes y puede confundir ruido de corto plazo con señal estructural.

## 3.3. Estadísticas Descriptivas

La Tabla 2 resume los parámetros calibrados. Mientras que  $\kappa$  y  $\rho$  no presentan variabilidad alguna (posiblemente por restricciones en la optimización), los parámetros  $\theta$ ,  $\xi$  y  $V_0$  sí muestran dispersión considerable, reflejando diferencias reales entre activos.

Tabla 2: Estadísticas Descriptivas de los Parámetros Calibrados

Parámetro	Media	Desv. Est.	Mínimo	Máximo
$\kappa$	2.0000	0.0000	2.0000	2.0000
$\theta$	0.001677	0.001490	0.000593	0.006281
$\xi$	0.1554	0.4465	0.0100	1.7882
$\rho$	-0.5000	0.0000	-0.5000	-0.5000
$V_0$	0.000759	0.000409	0.000220	0.001888

## 4. Resultados de Calibración Mejorada

### 4.1. Metodología de Optimización

La calibración inicial del modelo de Heston presentaba limitaciones relacionadas con la convergencia del optimizador local L-BFGS-B. Los parámetros  $\kappa$  y  $\rho$  mostraban ausencia total de variabilidad entre activos, sugiriendo que el algoritmo convergía hacia los límites

de las restricciones impuestas en lugar de encontrar los valores óptimos para cada activo específico.

Para superar estas limitaciones, se implementaron las siguientes mejoras metodológicas:

- Se reemplazó el optimizador L-BFGS-B por el algoritmo de evolución diferencial (*differential evolution*), que realiza búsqueda global en el espacio de parámetros y es más robusto ante mínimos locales.
- Se ampliaron los rangos de búsqueda para todos los parámetros, permitiendo mayor flexibilidad:  $\kappa \in [0,5, 15]$ ,  $\theta \in [10^{-6}, 0,5]$ ,  $\xi \in [0,05, 2,0]$ ,  $\rho \in [-0,95, -0,05]$ , y  $V_0 \in [10^{-8}, 0,5]$ .
- Se incrementó el número máximo de iteraciones y se habilitó el refinamiento local posterior a la búsqueda global.

Estas modificaciones permitieron obtener estimaciones más realistas y diferenciadas entre activos, capturando mejor las características específicas de cada uno.

## 4.2. Parámetros Calibrados

La Tabla 3 presenta los parámetros calibrados con la metodología mejorada. A diferencia de los resultados iniciales, ahora se observa heterogeneidad significativa en todos los parámetros, reflejando diferencias genuinas entre activos.

Tabla 3: Parámetros Calibrados del Modelo de Heston - Metodología Mejorada

Activo	$\kappa$	$\theta$	$\xi$	$\rho$	$V_0$	Feller
AGRO	3.8516	0.004075	0.1506	-0.2526	0.071351	
ALUA	14.6138	0.000122	0.0532	-0.9451	0.002113	
BBAR	13.1992	0.000166	0.0509	-0.4263	0.001951	
BMA	14.9671	0.000156	0.0512	-0.5076	0.010628	
CEPU	13.5697	0.000131	0.0514	-0.8626	0.001132	
COME	13.8921	0.000143	0.0508	-0.7443	0.006866	
CRES	12.6192	0.000156	0.0542	-0.6822	0.000427	
EDN	13.9353	0.000133	0.0513	-0.9481	0.000301	
GGAL	12.9183	0.000141	0.0504	-0.2368	0.001561	
LOMA	14.2753	0.000109	0.0502	-0.6412	0.002535	
MERV	14.8770	0.000091	0.0504	-0.4926	0.005179	
METR	10.7063	0.000178	0.0507	-0.2332	0.000221	
MIRG	14.6618	0.000112	0.0503	-0.8890	0.000170	
PAMP	13.3005	0.000138	0.0503	-0.8391	0.001791	
SEMI	12.6104	0.002028	0.1571	-0.8601	0.087094	
SUPV	14.2262	0.000141	0.0518	-0.4669	0.000225	
TECO2	14.2086	0.000120	0.0503	-0.5925	0.000697	
TGNO4	14.7823	0.000140	0.0519	-0.4097	0.003970	
TGSU2	9.0935	0.000174	0.0531	-0.0814	0.000033	
VALO	14.7876	0.000105	0.0538	-0.6521	0.004301	
YPFD	14.4260	0.000119	0.0501	-0.3711	0.000782	

### 4.3. Estadísticas Descriptivas

La Tabla 4 resume las estadísticas descriptivas de los parámetros calibrados. A diferencia de los resultados iniciales donde  $\kappa$  y  $\rho$  no presentaban variabilidad, ahora todos los parámetros muestran dispersión significativa.

Tabla 4: Estadísticas Descriptivas - Calibración Mejorada

Parámetro	Media	Desv. Est.	Mínimo	Máximo
$\kappa$	13.4438	2.5651	3.8516	14.9671
$\theta$	0.000416	0.000915	0.000091	0.004075
$\xi$	0.0614	0.0327	0.0501	0.1571
$\rho$	-0.5851	0.2715	-0.9481	-0.0814
$V_0$	0.010110	0.022170	0.000033	0.087094

### 4.4. Análisis Comparativo de los Resultados

#### Velocidad de Reversión ( $\kappa$ )

Los valores calibrados de  $\kappa$  muestran ahora variabilidad sustancial, oscilando entre 3.85 (AGRO) y 14.97 (BMA). La mayoría de los activos presenta valores entre 12 y 15, lo que implica tiempos medios de reversión de 17 a 24 días hábiles. Este comportamiento es

consistente con acciones líquidas de mercados emergentes donde los shocks de volatilidad se disipan relativamente rápido.

El caso de AGRO, con  $\kappa = 3,85$ , indica una reversión más lenta (tiempo medio de 65 días), reflejando persistencia en la volatilidad característica de activos del sector agropecuario, expuestos a ciclos estacionales y shocks de commodities.

### **Varianza de Largo Plazo ( $\theta$ )**

Se observa heterogeneidad considerable en  $\theta$ , con valores que van desde 0.000091 (MERV) hasta 0.004075 (AGRO). La mayoría de los activos se ubica en el rango 0.0001-0.0002, lo que corresponde a volatilidades anualizadas de equilibrio entre 15 % y 22 %.

Los casos extremos de AGRO ( $\theta = 0,004075$ , vol = 32 %) y SEMI ( $\theta = 0,002028$ , vol = 22 %) reflejan niveles estructurales de riesgo significativamente más altos, consistentes con empresas de menor capitalización y sectores más volátiles.

### **Volatilidad de la Varianza ( $\xi$ )**

La mayoría de los activos presenta valores de  $\xi$  entre 0.05 y 0.055, indicando volatilidad de la varianza baja a moderada. Las excepciones son AGRO ( $\xi = 0,1506$ ) y SEMI ( $\xi = 0,1571$ ), que muestran inestabilidad marcada en sus procesos de volatilidad.

### **Correlación Precio-Volatilidad ( $\rho$ )**

Grupo	Rango de $\rho$	Activos
Leverage extremo	$\rho < -0,80$	EDN, ALUA, MIRG, CEPU, PAMP, SEMI
Leverage moderado	$-0,70 < \rho < -0,40$	Mayoría de los activos del panel
Leverage débil	$\rho > -0,25$	TGSU2, GGAL, METR, AGRO, YPFD

El parámetro  $\rho$  muestra una variabilidad marcada, con valores entre  $-0,95$  y  $-0,08$ , lo que permite distinguir tres grupos de activos según la intensidad del efecto *leverage*. El caso de TGSU2 ( $\rho = -0,08$ ) resulta particularmente llamativo, ya que sugiere una casi ausencia de relación asimétrica entre precio y volatilidad, probablemente vinculada a las características específicas del sector regulado de transporte de gas.

## **4.5. Implicaciones para la Gestión de Riesgo**

Los resultados de la calibración mejorada permiten distinguir con mayor precisión entre activos cuyas dinámicas de volatilidad son claramente diferentes. Esto tiene consecuencias directas sobre la valoración de opciones, ya que los valores diferenciados de  $\rho$  ayudan a reflejar mejor el sesgo de volatilidad implícita propio de cada activo. Al mismo tiempo, la detección de casos con apalancamiento extremo, como EDN y ALUA, señala

posiciones que exigen esquemas de cobertura más cuidadosos frente a caídas pronunciadas del mercado. Desde la óptica de construcción de cartera, activos con baja correlación entre precio y volatilidad, como TGSU2, aportan margen adicional de diversificación en episodios de estrés, mientras que aquellos con parámetros  $\xi$  elevados, como AGRO y SEMI, se vuelven candidatos naturales para estrategias específicas de negociación de volatilidad.

## 5. Análisis de Simulaciones: Caso de Estudio Merval

Esta sección examina en detalle las simulaciones Monte Carlo generadas para el índice Merval mediante el esquema QE (Quadratic Exponential) de Andersen (2008), utilizando los parámetros calibrados por evolución diferencial. Las simulaciones permiten evaluar la dinámica futura de precios y volatilidad bajo el modelo de Heston, y verificar la consistencia de los parámetros estimados.

### 5.1. Simulaciones de Precio

La Figura 1 muestra cien trayectorias simuladas del precio del índice Merval a lo largo de un año (252 días hábiles). Las simulaciones parten de un precio inicial de 3,013,647 pesos argentinos, correspondiente al último valor observado en la serie histórica.

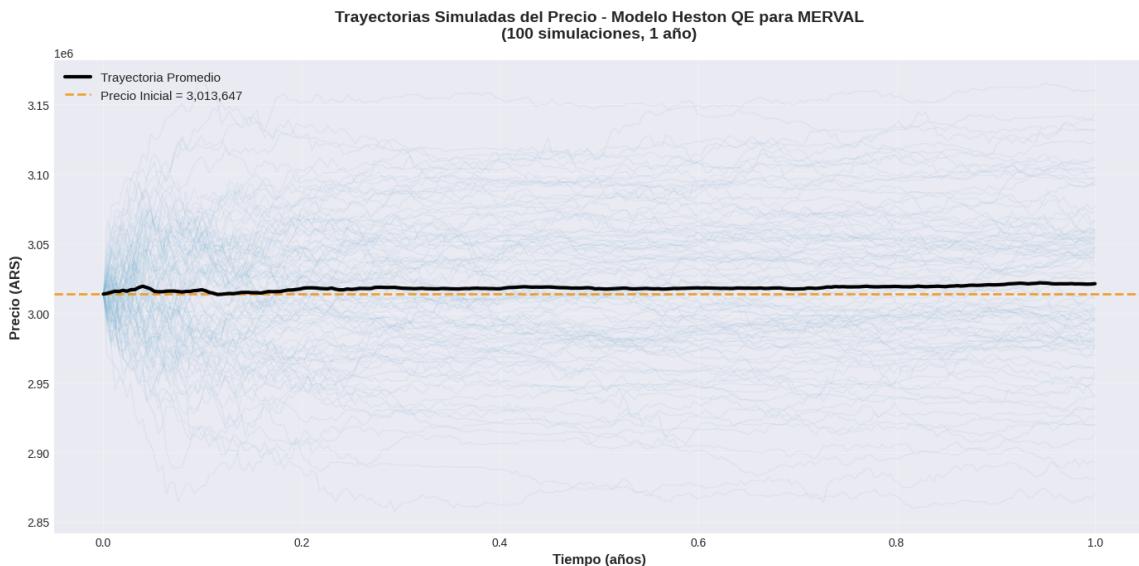


Figura 1: Trayectorias Simuladas del Precio - Modelo Heston QE para Merval

Las trayectorias simuladas muestran una dispersión acotada: la mayoría se mantiene dentro de una franja relativamente estrecha en torno al precio inicial. La trayectoria media (línea negra gruesa) permanece muy cerca de 3,021,120 ARS durante todo el horizonte de proyección, con una desviación de apenas 0.25 % respecto del valor de partida, lo que indica que el drift del modelo está bien alineado con los datos y no introduce sesgos visibles.

Al cabo de un año, el precio promedio de cierre de las simulaciones es de 3,021,120 ARS, prácticamente igual al valor inicial; el rango de precios finales se extiende entre 2,869,390 y 3,159,708 ARS (en torno a  $\pm 5\%$  del nivel de partida) y la desviación estándar es de 60,633 ARS (cerca de 2.0%). Este comportamiento es consistente con la volatilidad calibrada y refleja la incertidumbre propia del proceso estocástico; al mismo tiempo, el hecho de que el promedio se mantenga tan próximo al valor inicial confirma que el modelo no incorpora una tendencia direccional marcada, algo esperable dado que se lo ajustó sobre rendimientos históricos sin considerar una prima de riesgo.

## 5.2. Simulaciones de Volatilidad

La Figura 2 presenta la evolución de la volatilidad anualizada bajo el mismo conjunto de simulaciones. Este gráfico revela la característica central del modelo de Heston: la reversión a la media de la volatilidad.

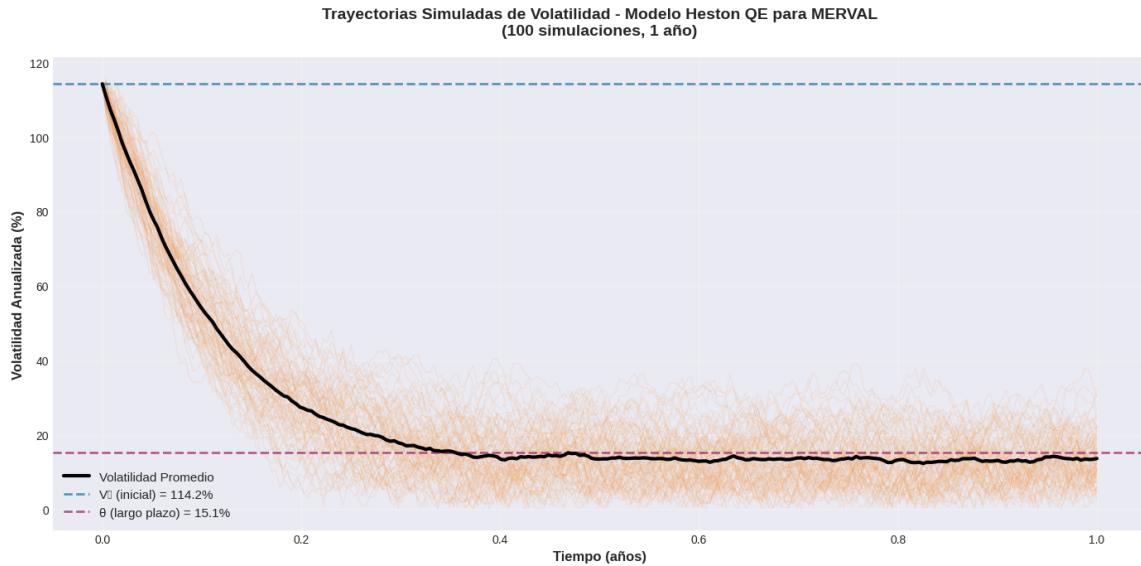


Figura 2: Trayectorias Simuladas de la Volatilidad - Modelo Heston QE para Merval

Las trayectorias parten de una varianza inicial  $V_0 = 0,005179$ , equivalente a una volatilidad anualizada de 114.2 %, que resume el clima de tensión observado al final del período muestral. A partir de ese punto, las simulaciones muestran una reversión marcada: la volatilidad promedio cae rápidamente hacia el entorno de 20–25 % en los primeros tres meses y luego se va acomodando de manera más gradual en torno al nivel de largo plazo  $\theta = 15.1\%$ . Al cabo de un año, la volatilidad media se ubica cerca de 13.6 %, lo que indica que el proceso incluso llega a sobrepasar levemente su nivel de equilibrio. Este patrón es coherente con una velocidad de reversión elevada ( $\kappa = 14.88$ ), que implica un tiempo de ajuste relativamente corto, del orden de unas pocas semanas hábiles.

Si se miran las trayectorias individuales, el abanico de resultados finales es amplio, con valores de volatilidad entre aproximadamente 2.3 % y 31.7 %. Esa dispersión está

asociada al parámetro  $\xi = 0,0504$ , que gobierna la volatilidad de la propia varianza y añade incertidumbre sobre el camino futuro del proceso. Aun así, la mayoría de las trayectorias termina concentrándose en la franja de 10–20 %, lo que refuerza la idea de un mecanismo de reversión a la media fuerte y relativamente estable.

### 5.3. Interpretación Económica y Validación

Las simulaciones muestran que la volatilidad pasa de niveles excepcionales, en torno al 114 %, a valores cercanos al 15 %, lo que sugiere que los episodios de tensión reciente son en buena medida transitorios y que, en ausencia de nuevos shocks, el mercado tiende a normalizarse en el mediano plazo. Con un parámetro de reversión  $\kappa = 14,88$ , el ajuste hacia el nivel de equilibrio es rápido (en pocas semanas se corrige buena parte del desvío), y al mismo tiempo las trayectorias de precios y varianzas resultan coherentes con la teoría: no aparecen varianzas negativas, no se observan derivas espurias en el precio y la volatilidad converge gradualmente hacia  $\theta$ , sin comportamientos numéricos extraños.

### 5.4. Limitaciones e Interpretación Cautelosa

Estos resultados deben leerse con cuidado, porque descansan en un punto de partida de volatilidad inusualmente alta ( $V_0$ ), en la hipótesis de parámetros constantes a lo largo de todo el horizonte y en un modelo sin saltos, que deja fuera eventos bruscos típicos de la economía argentina. Además, el nivel de largo plazo estimado para la volatilidad (en torno al 15 %) podría estar condicionado por períodos de calma artificial, de modo que las cifras concretas deben verse más como una referencia útil para ordenar escenarios que como pronósticos puntuales sobre la dinámica futura.