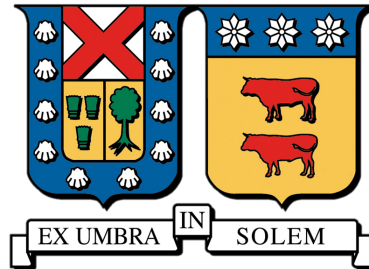


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA COMERCIAL



“Biologización y Estructura de Precios en el Mercado del Café:

Un análisis VECMX bajo la Teoría de los Tres Relojes (2008 – 2025)”

RODRIGO DANIEL GONZÁLEZ GÓMEZ

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO COMERCIAL

Profesora Guía: Macarena Gatica S.

Profesor Co-referente: Ricardo Pruneda U.

MARZO-2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: "Biologización y Estructura de Precios en el Mercado del Café: Un análisis VECMX bajo la Teoría de los Tres Relojes (2008 - 2025)"

Nombre del candidato(a): Rodrigo Daniel González Gómez

Carrera / Grado: Ingeniería Comercial

Campus: Casa Central

Departamento: Ingeniería Comercial

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Macarena Gatica Silva, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 10/marzo/2026 **Firma:** 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 17/marzo/2026 **Firma:** 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Resumen Ejecutivo

Contexto y Problemática

Durante el bienio 2024–2025, el mercado global del café Arábica ha experimentado una volatilidad estructural que desafía los modelos financieros convencionales. La intensificación de anomalías térmicas en Brasil y la crisis histórica de inventarios han validado un cambio de régimen hacia la *Nueva Normalidad Biológica*, donde el precio ya no responde únicamente a flujos de capital, sino a una compleja interacción de latencias biofísicas.

Objetivo e Hipótesis

Esta investigación cuantifica el impacto de las anomalías térmicas sobre el precio futuro del café Arábica mediante un modelo **VECMX** bajo la **Teoría de los Tres Relojes** (Financiero, Logístico-Climático y Estructural). Se hipotetiza que los fundamentos biofísicos han desplazado a los *drivers* macroeconómicos tradicionales como el atractor principal del sistema.

Marco Metodológico

La investigación adopta un enfoque cuantitativo longitudinal fundamentado en una muestra de $N = 938$ observaciones semanales. La arquitectura analítica se articula en tres fases críticas de identificación:

1. **Síntesis Financiera y Reducción de Dimensionalidad (PCA):** Se aplicó un Análisis de Componentes Principales (PCA) sobre el bloque financiero global, logrando sintetizar el **93,82%** de la varianza macroeconómica en dos factores ortogonales de riesgo sistémico y costo de capital. Este procedimiento asegura la parsimonia del modelo y mitiga sesgos por multicolinealidad.

2. **Modelación Estructural VECMX y Estabilidad:** El núcleo del estudio se basa en un modelo *Vector Error Correction* con variables Exógenas (**VECMX**), validado mediante el test de **Zivot-Andrews** para la identificación de quiebres estructurales endógenos. El sistema permitió identificar **4 vectores de cointegración**, definiendo las relaciones de equilibrio de largo plazo y cuantificando las velocidades de ajuste (α) ante perturbaciones climáticas.
3. **Identificación Dinámica (OIRF y FEVD):** La cuantificación de los impactos se realizó mediante Funciones de Impulso-Respuesta Ortogonalizadas (**OIRF**) y Descomposición de Varianza del Error de Pronóstico (**FEVD**). El análisis se ejecutó bajo una jerarquía de exogeneidad recursiva, validada mediante pruebas de robustez de liderazgo contemporáneo, para aislar la señal climática pura del ruido financiero.

Hallazgos Principales

Los resultados obtenidos permiten confirmar la transición del mercado hacia un régimen de determinación de precios gobernado por la **Nueva Normalidad Biológica**. La integración de la evidencia empírica se resume en los siguientes hitos:

- **Soberanía Informativa y Atractor Biológico (92,71 %):** La Descomposición de Varianza (FEVD) confirma que la ICE Nueva York es el epicentro soberano del descubrimiento de precios. Con una capacidad de explicar el 92,71 % de su varianza mediante choques propios, el mercado procesa el riesgo climático de forma autónoma, minimizando la influencia del ruido financiero global en el largo plazo.
- **Quiebre Estructural y Transición (Diciembre 2021):** Mediante el test de Zivot-Andrews, se identificó un punto de inflexión crítico en diciembre de 2021. Este hito estadístico marca el fin de la era de excedentes y el inicio de una transición hacia un régimen de escasez física persistente, el cual actúa como el nuevo nivel de soporte estructural para el bienio 2024–2025.
- **Jerarquía de los Tres Relojes:** Se validó que el mercado opera en tres temporalidades asíncronas: un **Reloj Financiero** de respuesta inmediata (S_7), un **Reloj Logístico-Climático** de ajuste medio ($S_{20} - S_{78}$) que internaliza los ciclos biológicos, y un **Reloj Inercial** de retroalimentación sistémica, que corresponde a un Reloj Estructural, que extiende la memoria del impacto hasta las **157 semanas**.

- **Invarianza Estructural del BRL:** Se demostró una estabilidad paramétrica excepcional en el canal cambiario, con una variación de apenas **0,01 %** entre el modelo base y las pruebas de robustez. Esto valida la consistencia del *pass-through* identificado y la resiliencia del mecanismo de transmisión hacia el sector exportador brasileño.
- **Espiral de Costos Inducida:** Se identificó un ciclo de retroalimentación donde los choques alcistas en el precio del café encarecen proporcionalmente los insumos estratégicos (WTI y fertilizantes). Este fenómeno consolida una estructura de costos más elevada, erosionando los márgenes operativos del productor de forma persistente.

Se concluye que el paradigma de la formación de precios ha sufrido una transformación irreversible. Se propone formalmente que el concepto clásico de *Convenience Yield*, de la Teoría del Almacenamiento, ha sido sustituido por una **Prima de Riesgo Biológico Permanente**, redefiniendo la jerarquía de los fundamentos y la gestión de riesgos en la era de la crisis climática global.

Conclusiones y Propuestas Estratégicas

La investigación concluye que el Arábica se comporta como un **activo con memoria biológica**. Se proponen tres pilares:

- **Estratégico:** Migrar hacia coberturas multivariadas que integren derivados de energía y clima, reconociendo la espiral de costos inducida.
- **Operativo:** Gestionar el *convenience yield* mediante el monitoreo crítico del Reloj Logístico (stocks ICE), anticipando procesos de histéresis económica.
- **Académico:** Integrar el análisis de cointegración bio-financiera en la formación comercial para gestionar *commodities* bajo regímenes de escasez técnica.

Palabras clave: Café Arábica, Teoría de los Tres Relojes, VECMX, Biologización, Histéresis, ICE Nueva York.

Executive Summary

Context and Problem Statement

During the 2024–2025 biennium, the global Arabica coffee market has experienced levels of structural volatility that challenge traditional financial models. The intensification of climate anomalies in Brazil, coupled with a historic inventory crisis, has validated a regime shift toward what this research defines as the **New Biological Normal** for this commodity. In this scenario, price no longer responds solely to capital flows but to a complex interaction of physical and biological latencies.

Objective and Hypothesis

The objective of this study is to quantify the impact of thermal anomalies in Brazil on Arabica coffee future prices, within the framework of the **Theory of the Three Clocks** (Financial, Logistic-Climatic, and Structural). The hypothesis posits that biophysical fundamentals have displaced traditional macroeconomic drivers, becoming the dominant attractor of the system.

Methodological Framework

An advanced quantitative approach was applied, structured into three phases:

1. **Financial PCA:** Dimensionality reduction used to synthesize 93.82% of macroeconomic variance into risk and cost-of-capital factors.
2. **VECMX Modeling:** Identification of four cointegration vectors to capture long-term equilibrium and the speed of adjustment (α).

3. **Structural Identification (OIRF/FEVD):** Shock simulation under a recursive exogeneity hierarchy, validated through contemporary leadership robustness checks.

Key Findings

- **Information Sovereignty (92.71 %):** Forecast Error Variance Decomposition confirms that ICE New York is the sovereign epicenter of price discovery, processing climate risk autonomously from global financial noise.
- **BRL Structural Invariance:** Exceptional parametric stability was demonstrated in the exchange rate channel, with a variation of merely **0.01 %** between the base and robustness models, validating the consistency of the identified pass-through.
- **Hierarchy of the Three Clocks:** The market operates across three temporalities: a fast-response **Financial Clock** (S_7), a medium-adjustment **Logistic Clock** ($S_{20} - S_{78}$), and a systemic feedback **Inertial Clock**, which functions as a Structural Clock, that extends the impact memory up to **157 weeks**.
- **Induced Cost Spiral:** It was identified that bullish price shocks provide positive feedback to input costs (WTI and fertilizers), consolidating a higher cost structure that pressures producer margins in the long term.

Conclusions and Strategic Proposals

The research concludes that Arabica coffee behaves as an **asset with biological memory**. Three pillars of action are proposed:

- **Strategic:** Shifting toward multivariate hedging strategies that integrate energy and climate derivatives, accounting for the induced cost spiral.
- **Operational:** Managing convenience yield through the critical monitoring of the Logistic Clock (ICE stocks), anticipating economic hysteresis processes.
- **Academic:** Integrating bio-financial cointegration analysis into business education to manage commodities under regimes of technical scarcity.

Keywords: Arabica Coffee, Theory of the Three Clocks, VECMX, Biologization, Hysteresis, ICE New York.

A mis padres, Angélica y Jorge, por ser mi cimiento.

A Sandra y Gus, mi motor y mi luz.

Y a mi yo del pasado, por no rendirse jamás.

Agradecimientos

A mi mamá, **Angélica Gómez S.**, y a mi papá, **Jorge González V.**. Gracias por los valores, el ejemplo entregado y por enseñarme que con perseverancia no hay meta inalcanzable. Gracias por el amor y apoyo incondicional que siempre me han entregado. Este logro es también de ustedes.

A **Sandra**, mi pareja y compañera de camino. Gracias por ser mi refugio en los momentos de mayor tensión y por la paciencia infinita durante la frustración y las jornadas de estudio.

A mi hijo **Gustavo**, mi querido "**Gus**". Eres mi mayor motivación y lo que le da fuerzas de gigante a cada paso que doy. Espero que este trabajo sea, en el futuro, un ejemplo para ti de que la constancia siempre rinde frutos.

A **Carito C.**, por introducirme en este fascinante mundo y contagiarme el gusto por el café; sin esa chispa inicial, esta investigación jamás habría nacido. A **David**, mi compañero de toda la carrera y mi partner incondicional; gracias por transitar conmigo cada trimestre en estos tres años, por los desafíos compartidos y por una amistad forjada entre estudio, libros, conversaciones y café.

Al equipo de "**Tiempo de Café**", *mi oficina* y mi spot de estudio. Gracias por el espacio, por el apoyo constante y por ser el entorno ideal donde las ideas de este seminario finalmente cobraron forma.

A mis **profesores**, quienes me entregaron su apoyo, conocimiento y expertise. Gracias por brindarme las herramientas para entender la complejidad de los mercados desde una visión técnica y humana.

Finalmente, a mi **yo del pasado**. Gracias por no rendirte cuando el camino se puso difícil. Gracias por enfrentar las dudas, los miedos y las inseguridades con valentía. Gracias por atreverte a soñar, por perseverar y por traernos con orgullo hasta el día de hoy.

A cada una y cada uno: **Gracias.**

Índice general

Resumen Ejecutivo	1
Executive Summary	4
Agradecimientos	8
Glosario de Términos	19
1. Introducción	25
1.1. Origen y Contexto de la Problemática	25
1.2. Propósito y Justificación de la Investigación	26
1.3. Taxonomía y Alcances de la Investigación	26
1.3.1. Clasificación Metodológica: Estudio Explicativo	26
1.3.2. Dimensiones del Análisis Temático	26
1.3.3. Delimitación Espacial y Nodos de Influencia	27
1.3.4. Horizonte Temporal y Sincronización de Series	27
1.4. Alcance Metodológico	27
1.5. Viabilidad del Estudio	28
1.5.1. Recursos Técnicos y Capacidad Computacional	29
1.5.2. Viabilidad Temporal	29
1.6. Objetivos del Estudio	30
1.6.1. Objetivo General	30
1.6.2. Objetivos Específicos	30
1.7. Planteamiento del Problema	30
1.8. Hipótesis de Trabajo	31
1.9. Alcances y Limitaciones	31

1.9.1. Alcances	31
1.9.2. Limitaciones del Estudio	31
2. Estado del Arte	33
2.1. Naturaleza Económica del Activo: El Café Arábica como Activo Agro-financiero . . .	33
2.1.1. De Commodity Agrícola a Estándar Global: El Rol de la ICE	33
2.1.2. La Teoría del Almacenamiento y la Formación de Expectativas	34
2.1.3. Financiarización y el Ruido Macroeconómico	34
2.2. La Transmisión del Riesgo Climático: De la Fenología a la Volatilidad de Mercado .	34
2.2.1. Vulnerabilidad Fisiológica y Ciclo de Bienalidad	35
2.2.2. Relevancia para la Ingeniería Comercial: El Clima como Shock de Información	35
2.3. Revisión de la Literatura Econométrica y sus Limitaciones	36
2.3.1. Modelos Econométricos Estructurales: La Ceguera Climática	36
2.3.2. Crítica al Canal de Incentivos (Exchange Rate Pass-Through)	36
2.4. La Evidencia Agronómica y el Ciclo Fenológico	36
2.4.1. El Impacto de Shocks Climáticos Extremos	37
2.4.2. El Ciclo Fenológico y el “Mercado Climático”	37
2.5. La Financiarización como Nuevo Determinante	37
2.6. Síntesis Crítica y Brecha de Conocimiento	37
2.7. Introducción Analítica	38
2.8. La Corriente Econométrica: Sofisticación Técnica y Limitaciones Sistemáticas	38
2.8.1. Consenso Metodológico en Econometría de Commodities	38
2.8.2. Las Limitaciones Fundamentales: Omisión Sistemática de Determinantes Cli- máticos	40
2.9. La Corriente Agronómica: Precisión Causal Sin Integración Econométrica	41
2.9.1. Elasticidades Cuantificadas de Impacto Climático	41
2.9.2. Ciclo Fenológico como Estructura de Vulnerabilidad	42
2.9.3. Rezagos Temporales Multianuales	42
2.10. Economía del Almacenamiento: Fundamento para Inclusión de Stocks ICE	42
2.10.1. Teoría Clásica del Almacenamiento	42
2.10.2. Dinámicas No Lineales del Convenience Yield	43
2.10.3. Stocks ICE como Variable Explicativa	44

2.11. El Impacto de la Financiarización y la Especulación	44
2.11.1. Definición y Evolución	44
2.11.2. Mecanismos de Amplificación de Volatilidad	44
2.11.3. Reporte COT como Medida Operacional	45
2.12. Mecanismo de Transmisión Cambiaria: Exchange Rate Pass-Through	45
2.12.1. Teoría del ERPT Incompleto	45
2.12.2. El “Canal de Rentabilidad”: Mecanismo Identificado	46
2.12.3. Interacción Crítica: ERPT y Capacidad Climática	46
2.13. Crítica Econométrica: El Problema de Regresión Espuria	46
2.13.1. La Sospecha de Granger–Newbold	46
2.13.2. Riesgos de Sobreajuste y Endogeneidad	47
2.13.3. VECM como Solución Metodológica	47
2.14. La Intensificación de la Volatilidad Climática y Nuevos Patrones de Riesgo (2023–2025)	48
2.14.1. El Estrés Térmico de 2023 y el “Falso Positivo” de 2024	48
2.14.2. La Crisis Hídrica de Floración (septiembre 2024)	48
2.14.3. El Riesgo de Calidad por Excesos Pluviométricos (mayo 2025)	48
2.15. Síntesis y Marco Conceptual: La Teoría de los Tres Relojos	49
3. Marco Metodológico	51
3.1. Diseño de la Investigación y Estrategia de Identificación	51
3.1.1. Resolución de la “Maldición de la Dimensionalidad”	51
3.1.2. Especificación del Sistema Endógeno y Exógeno	52
3.1.3. Consistencia Temporal y Frecuencia de la Muestra	52
3.1.4. Definición de la Frecuencia: El Imperativo de la Especulación	53
3.1.5. Ortogonalización de Riesgos Financieros (PCA)	53
3.1.6. Inclusión de la Teoría del Almacenamiento	54
3.2. Selección, Tratamiento y Definición de Datos	55
3.2.1. Especificación y Taxonomía del Sistema de Variables (y_t, x_t)	55
3.2.2. Variables Cualitativas y Choques Estructurales	57
3.3. Especificación Estructural del Modelo VECMX	58
3.3.1. Identificación Estructural: La Jerarquía de los Tres Relojos	60

3.3.2. Identificación Estructural: Funciones de Impulso-Respuesta Ortogonalizadas (OIRF)	63
3.4. Pruebas de Diagnóstico y Estabilidad	64
3.4.1. Etapa 1: Protocolos de Estacionariedad y Detección de Quiebres Estructurales	64
3.4.2. Etapa 2: Determinación del Rango de Cointegración y Sincronización de Relojes	64
3.4.3. Etapa 3: Protocolos de Validación Post-estimación y Diagnóstico	65
3.4.4. Etapa 4: Validación de Exogeneidad Débil y Causalidad de Largo Plazo . . .	66
3.4.5. Etapa 5: Análisis Dinámico e Identificación Estructural de Shocks	66
3.4.6. Infraestructura Computacional y Flujo de Trabajo Operacional	67
3.4.7. Aportes Metodológicos y Contribución al Estado del Arte	68
4. Aplicación Metodológica: Análisis y Discusión de Resultados	70
4.1. Reducción de Dimensionalidad: PCA del Entorno Financiero Global	70
4.1.1. Reducción de Dimensionalidad: Análisis de Componentes Principales (PCA) .	70
4.2. Análisis Descriptivo de las Variables	73
4.2.1. Estadística Descriptiva del Sistema	74
4.2.2. Análisis de distribución y validación de <i>outliers</i>	78
4.2.3. Análisis de dispersión: determinantes críticos del precio	83
4.2.4. Análisis de correlación dinámica: indicios de cambio en el régimen dominante	86
4.2.5. Evolución temporal de las series	89
4.2.6. Paneles de evolución sistémica: interacción dinámica del mercado	93
4.2.7. Síntesis final del diagnóstico de series temporales	99
4.3. Verificación de Supuestos Econométricos	100
4.3.1. Estacionariedad y Quiebres Estructurales	100
4.3.2. Interpretación de Resultados: Resiliencia de la Raíz Unitaria	103
4.3.3. Determinación de la Estructura Óptima de Rezagos	104
4.3.4. Resultados del Test de Cointegración de Johansen	105
4.3.5. Estimación del Modelo VECMX y Análisis de Corto Plazo	106
4.3.6. Análisis de los Determinantes de Corto Plazo	107
4.3.7. Diagnóstico de Residuos y Validez Estadística	108
4.3.8. Pruebas de Estabilidad Estructural: CUSUM y CUSUM-Q	109
4.3.9. Prueba de Exogeneidad Débil y Liderazgo de Mercado	110

4.3.10. Visualización de la Dinámica de Poder en el Mercado	112
4.4. Análisis de Dinámica de Transmisión (OIRF)	113
4.4.1. Cuantificación y Estandarización de las Perturbaciones	113
4.4.2. Metodología de Definición de Choques: Innovaciones vs. Serie Original	113
4.4.3. Interpretación Dinámica de las Respuestas al Impulso (OIRF)	115
4.4.4. Bloque 1: Arbitraje y Liderazgo entre Mercados	115
4.4.5. Bloque 2: Fundamentos Físicos vs. Especulación Financiera	117
4.4.6. Bloque 3: Estructura de Costos y Pass-through de Insumos	118
4.4.7. Bloque 4: Dinámica Macroeconómica Global y Efecto Cambiario	120
4.4.8. Síntesis de Estabilización y Persistencia	122
4.5. Análisis de Escenarios: Noticia Climática vs. Crisis de Oferta	122
4.5.1. Dinámicas de Respuesta Diferenciadas: Inercia vs. Soporte	123
4.6. Análisis de Retroalimentación y Estabilidad del Sistema	125
4.6.1. Síntesis de Retroalimentación Sistémica: El Rol del Café como Impulsor	129
4.7. Análisis de Descomposición de Varianza (FEVD)	130
4.7.1. Interpretación de la Soberanía Informativa	132
4.7.2. Soberanía de Mercado y la Biologización de la Volatilidad	132
4.7.3. Validación Estructural de la Teoría de los Tres Relojos	133
4.8. Contraste de Hipótesis y Respuesta a la Pregunta de Investigación	134
4.8.1. Validación de Hipótesis de Investigación	134
4.8.2. Respuesta Integrada a la Interrogante de Investigación	134
4.9. Análisis de Resultados y Aplicación Metodológica	135
4.9.1. El Entorno Financiero y la Reducción de Ruido (PCA)	135
4.9.2. El “Efecto Tijera” y la Dominancia Climática	135
4.9.3. Diagnóstico del Núcleo Econométrico (VECMX) y OIRF	136
4.9.4. Validación Estructural de la Teoría de los Tres Relojos	136
5. Análisis y Discusión de Resultados	137
5.1. Evidencia Empírica y Dinámica del Sistema	137
5.1.1. Reducción de Ruido Macroeconómico (PCA)	137
5.1.2. El “Efecto Tijera” y la Nueva Normalidad Biológica	137
5.1.3. Soberanía Informativa y Descubrimiento de Precios (FEVD)	137

5.1.4. Núcleo Econométrico: Histéresis y Memoria Biológica	138
5.2. Contraste de Hipótesis y Respuesta a la Investigación	138
5.2.1. Validación de Hipótesis de Trabajo	138
5.2.2. Respuesta a la Interrogante de Investigación	138
6. Conclusiones y Recomendaciones	139
6.1. Síntesis Estratégica: La Teoría de los Tres Relojes	139
6.2. Implicancias Estratégicas y Recomendaciones	140
6.2.1. Para la Gestión de Riesgos Corporativos	140
6.2.2. Para Comercializadores y Exportadores	140
6.3. Recomendaciones para la Formación Profesional	140
6.4. Limitaciones y Futuras Investigaciones	141
6.5. Reflexión Final	141
Declaración de Disponibilidad de Datos y Código	146
A. Diccionario de Datos y Variables	147
A.1. Matriz de Metadatos y Fuentes	147
A.2. Estadísticos Descriptivos de las Series Transformadas	148
A.3. Muestra de la Estructura de Datos Final	148
B. Scripts de Implementación y Reproducibilidad	149
B.1. Adquisición y Curaduría de Datos Financieros (ETL)	149
B.2. Adquisición y Procesamiento de Datos Climáticos	151
B.3. Consolidación de Fuentes Externas (Manual y API)	153
B.4. Análisis de Componentes Principales (PCA) y Dummies	155
B.5. Análisis de Estacionariedad y Quiebres Estructurales	156
B.6. Selección de Rezagos y Cointegración de Johansen	157
B.7. Validación y Estabilidad Estructural	158
B.8. Análisis de Exogeneidad Débil y Dinámica	158

Índice de cuadros

2.1. Indicadores de mercado de café: situación reciente vs. rangos históricos	43
2.2. Matriz de brechas metodológicas y resolución mediante el enfoque de los Tres Relojes	50
3.1. Matriz de Correspondencia: Teoría, Concepto y Nomenclatura Programática	55
3.2. Clasificación y Rol de las Variables en el Modelo VECMX	57
3.3. Cronología y definición de variables determinísticas (D_t)	58
4.1. Cargas de las variables financieras en los componentes principales	72
4.2. Estadística descriptiva del ecosistema de datos (2008–2025)	74
4.3. Resultados del Test de Raíz Unitaria ADF (Niveles)	101
4.4. Resultados de la Prueba de Zivot-Andrews (Quiebre en Intercepto y Tendencia). . .	101
4.5. Resultados del Test de Raíz Unitaria ADF (Primeras Diferencias)	105
4.6. Criterios de Selección de Rezagos para el Sistema VAR	105
4.7. Test de la Traza de Johansen	106
4.8. Resultados de la Estimación del Modelo VECMX (Ecuación $\log_cafe$)	106
4.9. Pruebas de Diagnóstico Multivariado del Sistema VECMX	108
4.10. Resultados Finales del Test de Exogeneidad Débil ($r = 4$)	111
4.11. Magnitud de los Choques de Simulación (1 Desviación Estándar)	114
4.12. Hitos de Convergencia: Inventarios vs. Especulación.	118
4.13. Resumen de Estabilización: Variables Cambiarias vs. Macroeconómicas.	122
4.14. Síntesis Global de Impactos Dinámicos: Valores Base vs. Robustez.	123
4.15. Síntesis Global de Impactos Dinámicos: Convergencia y Eficiencia del Mercado. . . .	124
4.16. Resumen de Retroalimentación Final: Impacto del Precio sobre el Sistema Completo.	129
4.17. Descomposición de Varianza del Precio del Café ($\log_cafe$)	130
4.18. Resumen de Decisiones Estadísticas sobre las Hipótesis del Seminario	135

5.1. Resumen de Decisiones Estadísticas sobre las Hipótesis	138
A.1. Matriz de metadatos: consistencia entre símbolos, fuentes y tratamiento.	147
A.2. Estadísticos descriptivos del sistema. (*) Denota rechazo de normalidad al 1 %. . . .	148
A.3. Vista de auditoría de la base de datos semanal ($N = 938$).	148

Índice de figuras

4.1. Gráfico de sedimentación: porcentaje de varianza explicada por cada dimensión. . . .	71
4.2. Mapa de variables: contribución y proyección en el espacio de PC1 y PC2.	73
4.3. Matriz de correlación: interdependencias entre fundamentos, clima y finanzas	76
4.4. Panel de distribución y boxplots: variables endógenas de mercado.	78
4.5. Panel de distribución y boxplots: choques exógenos (clima e insumos).	80
4.6. Panel de distribución y boxplots: bloque financiero y factores sintéticos.	82
4.7. Diagramas de dispersión: relación del Log Café con stocks, clima, especulación y Robusta.	84
4.8. Correlación dinámica (52 semanas): evolución del factor financiero y del factor climático.	86
4.9. Dinámica de producción: ciclo bianual estructural y proyección para 2025.	90
4.10. Ciclo bianual frente a estrés térmico y pluviométrico (Z-Scores).	92
4.11. Panel A: evolución temporal de precios, inventarios y especulación (Z-Scores).	94
4.12. Panel B: evolución de choques biofísicos e insumos (Z-Scores).	96
4.13. Panel C: evolución del entorno macro-financiero (Z-Scores).	98
4.14. Resultado del Test de Zivot-Andrews para la serie <i>log_cafe</i>	102
4.15. Pruebas de Estabilidad Estructural para la Ecuación del Café	110
4.16. Mapa de Jerarquía Informativa y Transmisión de Choques en el Sistema VECMX . .	112
4.17. Funciones de Impulso-Respuesta: Dinámica de arbitraje Arábica-Robusta (104 semanas).	116
4.18. Comparativa de Robustez y Convergencia de Largo Plazo (300 semanas).	119
4.19. Prueba de Robustez del Canal Cambiario: Comparativa entre el modelo base y la jerarquía de liderazgo (BRL).	121

4.20. Funciones de Impulso-Respuesta: Retroalimentación sistémica y efectos de largo plazo (156 semanas).	126
4.21. Funciones de Impulso-Respuesta: Dinámica de retroalimentación hacia insumos (312 semanas).	128
4.22. Análisis gráfico de la Descomposición de Varianza (FEVD) del precio del café Arábica.	131

Glosario de Términos

En esta sección se definen los conceptos técnicos fundamentales utilizados en la investigación, con el fin de facilitar su comprensión para profesionales de diversas áreas del conocimiento.

Bloque Econométrico y Estadístico

VECMX: Modelo de Vectores de Corrección de Errores con variables Exógenas. Sistema dinámico que analiza cómo un grupo de variables retorna a su equilibrio tras sufrir perturbaciones, incorporando factores externos (como el clima) que afectan al sistema sin ser afectados por este.

Cointegración: Propiedad estadística que describe una relación estable y de largo plazo entre variables que, aunque fluctúen de forma independiente en el corto plazo, comparten una trayectoria común gobernada por fundamentos económicos.

OIRF (Impulso-Respuesta): Técnica de simulación que permite visualizar la trayectoria y persistencia de una variable (ej. precio) ante un choque inesperado en otra (ej. anomalía térmica).

FEVD (Descomposición de Varianza): Análisis que cuantifica la importancia relativa de cada variable en la explicación de las fluctuaciones de otra. Determina quién tiene el "liderazgo informativo" en el sistema.

Test de Zivot-Andrews: Prueba estadística diseñada para detectar el momento exacto en que una serie de datos sufre un "quiebre estructural" o cambio de régimen, permitiendo identificar hitos históricos que alteraron el comportamiento del mercado.

PCA (Análisis de Componentes Principales): Técnica de reducción de datos que sintetiza la información de múltiples variables correlacionadas en un número menor de factores (componentes), facilitando la identificación de patrones sistémicos sin perder información relevante.

Velocidad de Ajuste (α): Coeficiente que mide la capacidad del sistema para corregir desviaciones respecto al equilibrio de largo plazo. Determina qué porcentaje del "error" del periodo anterior se elimina en cada nueva semana.

Estacionariedad: Propiedad de una serie de tiempo cuyas características estadísticas (media y varianza) son constantes en el tiempo. Es un requisito fundamental para evitar correlaciones falsas en modelos dinámicos.

Test de Johansen: Procedimiento estadístico multivariado que permite determinar el número de relaciones de equilibrio de largo plazo (cointegración) entre las variables endógenas del sistema.

Endogeneidad: Situación en la que una variable es determinada dentro del sistema de ecuaciones, existiendo una correlación recíproca con otras variables del modelo.

Criterios de Información (AIC/BIC): Pruebas estadísticas utilizadas para la selección óptima de rezagos en un modelo. Buscan maximizar la capacidad explicativa del sistema evitando el sobreajuste (overfitting).

Ortogonalización: Procedimiento matemático (frecuentemente mediante la descomposición de Cholesky) que permite aislar los choques de cada variable, asegurando que las funciones de impulso-respuesta capturen efectos causales puros.

Atractor: En sistemas dinámicos y cointegración, representa el estado o trayectoria de equilibrio hacia el cual el sistema converge en el largo plazo después de ser perturbado.

Bloque Financiero y de Mercados

Posición Neta (Net Position): Diferencia agregada entre contratos de compra y venta mantenidos por inversionistas no comerciales (especuladores). Actúa como un indicador del sentimiento de mercado y de la presión de demanda financiera sobre el precio.

Convenience Yield: Beneficio o ventaja no pecuniaria asociada a la tenencia física de un inventario. En contextos de escasez, representa la prima que el mercado asigna a la disponibilidad inmediata del activo físico frente a un contrato futuro.

Exchange Rate Pass-through: Grado en que las fluctuaciones del tipo de cambio (específicamente el par BRL/USD) se transmiten a los precios de exportación o al precio de referencia internacional en la ICE Nueva York.

Financiarización: Proceso de creciente influencia de los mercados e instituciones financieras en la determinación de precios de los activos físicos, correlacionando el valor de los commodities con indicadores macroeconómicos globales.

Backwardation: Estructura de precios en la que el valor al contado (spot) es superior al precio futuro. Es un síntoma de escasez crítica en el mercado físico, donde la urgencia de entrega inmediata supera los costos de almacenamiento.

Teoría de los Tres Relojes: Propuesta analítica de esta investigación que categoriza la dinámica de precios en tres temporalidades: Financiera (corto plazo/especulativa), Logística (mediano plazo/suministro) y Estructural (largo plazo/biológica).

Prima de Riesgo Biológico: Concepto propuesto en esta memoria que representa el sobre costo asignado al activo físico debido a la incertidumbre sobre la capacidad productiva futura de la planta, ante el incremento de choques climáticos extremos.

Efecto Tobogán: Dinámica de ajuste observada en el tipo de cambio (BRL/USD), caracterizada por una apreciación lenta, inercial y persistente ante incrementos estructurales en el precio del activo exportado.

Price Discovery (Descubrimiento de Precios): Proceso mediante el cual el mercado interactúa para determinar el precio de equilibrio, integrando expectativas especulativas, fundamentos de oferta y choques externos.

Spread Arábica-Robusta: Diferencial de precio entre las dos variedades de café más comercializadas. Es un indicador de sustitución tecnológica en la industria de los tostadores y un determinante de la demanda relativa.

Diferencial de Origen: Premio o descuento aplicado sobre el precio de referencia de la bolsa (ICE NY) que refleja las características específicas de calidad, logística y disponibilidad de un café de un origen determinado.

Arbitraje: Operación financiera y logística que busca obtener beneficios mediante el aprovechamiento de diferencias de precios entre distintos mercados o vencimientos temporales, contribuyendo a la convergencia de precios.

Soberanía de Mercado: Capacidad del sistema de precios para autorregularse y reflejar la escasez real del activo, logrando que los fundamentos de oferta y demanda se impongan sobre la volatilidad especulativa transitoria en el largo plazo.

Soberanía Informativa: Jerarquía y autonomía en el proceso de *Price Discovery* donde el mercado prioriza el procesamiento de datos fundamentales (reportes climáticos y niveles de existencias) sobre indicadores de liquidez global o noticias financieras. Estadísticamente, se manifiesta cuando la descomposición de varianza (FEVD) muestra un alto porcentaje de varianza propia (ej. 92,71 %), indicando que el sistema actúa como el emisor primario de señales de precio basadas en fundamentos reales y no meramente especulativos.

Bloque Biofísico y Logístico

Anomalía Térmica: Desviación de la temperatura observada respecto al promedio histórico de una región geográfica específica. En esta investigación, se utiliza como indicador de estrés térmico en el cinturón cafetero de Brasil.

Ciclo Bienal: Fenómeno biológico del café Arábica caracterizado por la alternancia de cosechas abundantes (año *on*) y reducidas (año *off*). Este ciclo impone una restricción estructural a la oferta que condiciona la memoria del mercado.

Stocks Certificados: Inventarios de café físico depositados en bodegas autorizadas por la Intercontinental Exchange (ICE). Representan la reserva de liquidez física del mercado y su nivel es un determinante crítico del *convenience yield*.

Latencia Biológica: Retraso temporal entre la ocurrencia de un fenómeno meteorológico y la manifestación de sus efectos en el rendimiento agrícola. Es el fundamento biológico de la histéresis observada en las funciones de impulso-respuesta.

Año Civil vs. Año Cosecha: Distinción temporal entre el calendario administrativo (enero-diciembre) y el ciclo productivo agrícola, el cual en Brasil suele comenzar con las floraciones de septiembre/octubre.

Histéresis: Fenómeno por el cual el estado de un sistema depende de su historia reciente. En este contexto, explica por qué el impacto de un choque climático persiste en los precios incluso después de que las condiciones meteorológicas han retornado a la normalidad.

Estrés Hídrico/Térmico: Respuesta fisiológica del cafeto ante la falta de agua o temperaturas excesivas, que afecta directamente la floración y el llenado del grano, traduciéndose en una pérdida de rendimiento físico con efectos multianuales.

Cost of Carry (Costo de Mantenimiento): Costo total de almacenar un activo físico, incluyendo gastos de bodega, seguros y el costo de oportunidad del capital retenido. Es un determinante central de la relación entre precios spot y futuros.

Insumos Estratégicos: Factores de producción externos (como el petróleo WTI y fertilizantes) cuyos costos condicionan la rentabilidad del productor y definen el límite inferior de los precios en el largo plazo.

Memoria del Proceso: Propiedad de una serie de tiempo que indica la persistencia de los impactos pasados sobre el valor presente. Una "memoria larga" sugiere que el mercado tarda años en absorber completamente un choque climático.

Evapotranspiración: Proceso biofísico que combina la evaporación del suelo y la transpiración de la planta. Es el mecanismo físico mediante el cual las anomalías térmicas afectan el rendimiento del cafeto, vinculando el clima con la oferta final.

Nueva Normalidad Biológica: Estado del mercado identificado en esta investigación donde los determinantes biofísicos (clima y stocks físicos) desplazan a los factores macroeconómicos tradicionales como los conductores primarios de la tendencia de precios.

Commodity Currency: Divisa de un país (como el Real Brasileño) cuyo valor está intrínsecamente ligado al precio de exportación de sus materias primas principales. En este estudio, explica la cointegración estructural entre el BRL y el Arábica.

Crowded Trades: Fenómeno de saturación de mercado donde una gran proporción de participantes mantienen la misma posición especulativa. Explica por qué el precio puede corregir a la baja a pesar de un sentimiento alcista, debido al agotamiento de nuevos compradores.

Soberanía Biofísica: Estado de dominancia absoluta de los fundamentos biológicos (clima, ciclos fenológicos) sobre los flujos de capital. En este régimen, el precio del café se desprende de las dinámicas financieras para obedecer únicamente a la latencia de la planta.

Soberanía de la ICE: Influencia determinante de los inventarios certificados de la *Intercontinental Exchange* como ancla física del precio futuro. Representa el "atractor físico" final; cuando esta soberanía se impone, el mercado ignora el sentimiento macroeconómico para enfocarse en la disponibilidad en bodegas.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Origen y Contexto de la Problemática

El café Arábica se ha consolidado como un **activo agro-financiero de alta complejidad estructural**. Su contrato de referencia en la Intercontinental Exchange (ICE) de Nueva York no solo actúa como un barómetro de precios físicos, sino como el epicentro de un proceso de *Price Discovery* donde la volatilidad compromete la solvencia del parque cafetero y activa riesgos sistémicos en las estrategias de *cross-hedging* de los *traders* globales.

Bajo la hegemonía de Brasil (35 % de la oferta mundial), el mercado experimenta una **biologización de los fundamentos**: una fase de histéresis donde las perturbaciones climáticas dejan de ser ruidos transitorios para constituirse como determinantes de régimen. Durante el ciclo 2024–2025, anomalías térmicas de hasta +3°C anularon la ciclicidad de bienalidad positiva, proyectando una contracción del 12,4 % en la producción y validando la fragilidad de los rendimientos marginales ante el estrés hídrico severo.

Simultáneamente, la **financiarización profunda** integra al café en carteras multiactivos. Aquí, la varianza del precio es endógena al posicionamiento de los *Money Managers* y a factores macroeconómicos como el *Dollar Index* (DXY) y el *Treasury Yield* a 10 años (T10). Esta intersección exige un marco analítico que logre la **identificación causal** de los choques climáticos, aislándolos de la señal financiera pura.

1.2. Propósito y Justificación de la Investigación

Esta investigación se propone cerrar la brecha entre la fragmentación macroeconómica y la evidencia agronómica mediante una arquitectura analítica que sintetice ambas dimensiones, justificándose bajo tres pilares:

1. **Valor Teórico y Biologización:** Contribuye a la literatura de *financialization of commodities* introduciendo el clima no como un ruido estocástico, sino como un **determinante estructural de régimen**. Se analiza cómo, en contextos de escasez extrema, el “Reloj Climático” subordina al “Reloj Financiero”.
2. **Relevancia Social y Memoria de Mercado:** Permite caracterizar la **histéresis del mercado**; es decir, la persistencia temporal de los choques. La confirmación física de rendimientos decrecientes requiere de un proceso de descubrimiento de precios que este modelo cuantifica con precisión.
3. **Utilidad Metodológica:** Implementa un modelo VECMX complementado con una **matriz de ponderación espacial dinámica** para el clima, filtrando el ruido meteorológico nacional para aproximar la señal pura del cinturón cafetero brasileño.

1.3. Taxonomía y Alcances de la Investigación

1.3.1. Clasificación Metodológica: Estudio Explicativo

De acuerdo con Hernández-Sampieri (Hernández-Sampieri y Mendoza, 2018), el estudio se define como una investigación de alcance **explicativo**, de diseño **no experimental longitudinal**. Su propósito es analizar los mecanismos de transmisión entre variables biofísicas y financieras mediante el uso de un modelo de **Vector de Corrección de Errores (VECM)**, caracterizando tanto el equilibrio de largo plazo como la dinámica de ajuste ante perturbaciones externas.

1.3.2. Dimensiones del Análisis Temático

El estudio integra tres dimensiones críticas para la formación del precio:

- **Dimensión biofísica:** Umbrales críticos de estrés hídrico en Brasil y su impacto en la productividad marginal.

- **Dimensión de mercado:** Dinámica de inventarios certificados (stocks ICE) y el **spread Árábica-Robusta** ante la escasez estructural de 2025.
- **Dimensión macro-financiera:** Proceso de financiarización (reporte COT) y entorno macro global sintetizado mediante PCA.

1.3.3. Delimitación Espacial y Nodos de Influencia

- **Nodo de determinación:** ICE Nueva York (formación de expectativas globales).
- **Nodos de emisión de shocks:** Sudeste brasileño (Minas Gerais, São Paulo y Espírito Santo), actuando como *price-setter* físico.
- **Nodos de liquidez:** Mercados financieros de EE.UU. (proxies de apetito por riesgo sistémico).

1.3.4. Horizonte Temporal y Sincronización de Series

La investigación abarca desde el **4 de enero de 2008 hasta el 31 de diciembre de 2025** ($N = 938$ observaciones). Esta ventana garantiza la captura de la financiarización post-crisis y el monitoreo integral del choque climático de la zafra 2025.

1.4. Alcance Metodológico

La investigación adopta un enfoque cuantitativo, no experimental y de corte longitudinal, fundamentado en la modelación econométrica de series de tiempo multivariadas. El diseño metodológico trasciende la estimación lineal simple para proponer una arquitectura capaz de integrar la información biofísica (clima) con la modelación estructural de precios, incorporando simultáneamente la financiarización, la teoría del almacenamiento y la transmisión cambiaria.

Para garantizar la parsimonia, la estabilidad del sistema y la interpretabilidad de los resultados, se implementa una estrategia técnica dividida en cuatro fases:

- **Reducción de dimensionalidad y ortogonalización (PCA):** ante la elevada multicolinealidad entre los activos financieros (S&P 500, DXY y tasas del Tesoro a 10 años), se aplicará un Análisis de Componentes Principales. Este procedimiento permitirá extraer un número reducido de factores sintéticos que concentren la mayor parte de la varianza conjunta

del bloque financiero, reduciendo la complejidad paramétrica y facilitando la identificación del efecto de las variables climáticas y de oferta física sobre el precio.

- **Modelación estructural (VECM):** se utilizará un modelo de **Vector de Corrección de Errores (VECM)** para estimar la dinámica conjunta y las relaciones de cointegración entre las variables endógenas (precio del Arábica, precio del Robusta, stocks certificados, tipo de cambio BRL/USD y factores financieros sintéticos). El enfoque de Johansen permite identificar las relaciones de equilibrio de largo plazo y cuantificar la velocidad de ajuste ante desviaciones transitorias, capturando la endogeneidad intrínseca del mercado cafetero.
- **Análisis de dinámica de *shocks* (IRF y FEVD):** se emplearán funciones de **impulso-respuesta (IRF)** y la **descomposición de la varianza del error de pronóstico (FEVD)**. Estas herramientas permiten cuantificar la persistencia temporal de los choques (memoria del mercado) y determinar la importancia relativa de cada variable en la volatilidad del precio a lo largo de un horizonte de, hasta, 312 semanas.
- **Validación de estabilidad intertemporal (tests de quiebre estructural):** se incorporará un análisis de quiebres estructurales, incluyendo el Test de Chow y pruebas afines, para evaluar la robustez de los parámetros. Esta validación es crítica para determinar si la sensibilidad del precio ante anomalías térmicas ha sufrido transformaciones significativas tras hitos climáticos, como las heladas de 2021 o el inicio del ciclo de estrés hídrico asociado a la zafra 2025.

Bajo esta estructura, el estudio no se limita a documentar correlaciones, sino que propone un esquema de transmisión en el cual anomalías físicas en Brasil, condicionadas por el nivel de inventarios y el entorno financiero global, se traducen en presiones alcistas o bajistas sobre el precio futuro del café en Nueva York. Se reconoce, no obstante, que la identificación causal es parcial y depende de los supuestos de especificación del modelo.

1.5. Viabilidad del Estudio

La ejecución de esta investigación es plenamente viable gracias a la convergencia de tres pilares fundamentales: acceso adecuado a fuentes de datos, infraestructura tecnológica suficiente y una planificación temporal estructurada.

Disponibilidad de Datos y Acceso a Fuentes

El estudio se sustenta en bases de datos de acceso institucional y público ya validadas:

- **Datos financieros:** acceso a terminales de ICE para la extracción de precios de futuros e inventarios certificados, complementados con datos históricos extraídos desde *Yahoo Finance* para los contratos de futuros de Arábica (KC=F) y Robusta (LRC=F), el índice S&P 500, el índice dólar (DXY) y como proxy de fertilizantes el precio stock (CF) de CF Industries Holdings INC
- **Datos macroeconómicos:** series de tipo de cambio BRL/USD, tasas de interés de los bonos del Tesoro de Estados Unidos a 10 años (T10) y precios del petróleo WTI obtenidos desde la base *Federal Reserve Economic Data* (FRED).
- **Datos biofísicos:** histórico de anomalías climáticas proveniente de *NASA POWER*, utilizando temperatura a 2 metros y precipitación total corregida para las principales mesorregiones cafeteras de arábica en Brasil.
- **Datos de posiciones especulativas:** reporte *Commitment of Traders* (COT) de la *Commodity Futures Trading Commission* (CFTC), desde donde se construye la posición neta de los *Money Managers*.
- **Datos de producción física:** estadísticas de producción anual de café Arábica obtenidas de la Pesquisa Agrícola Municipal (PAM) del IBGE, específicamente de la tabela 1613, armonizadas con los boletines de safra de CONAB.

1.5.1. Recursos Técnicos y Capacidad Computacional

Para el procesamiento de datos y la estimación del modelo VECM, se cuenta con el entorno de programación **R** (versión 4.X) y el IDE **Positron**. Se emplean librerías especializadas en econometría de series de tiempo (*tsDyn*, *vars*) y análisis de componentes principales (*FactoMineR*), soportadas por infraestructura de procesamiento local y servicios en la nube.

1.5.2. Viabilidad Temporal

La investigación se ha estructurado en un horizonte de ejecución que abarca desde la recolección inicial de datos hasta la validación de los resultados del cierre de la zafra 2025.

1.6. Objetivos del Estudio

1.6.1. Objetivo General

Analizar el mecanismo de transmisión de choques climáticos y financieros sobre el precio futuro del café Arábica mediante un modelo VECMX, con el fin de cuantificar la sensibilidad de largo plazo y la memoria del mercado ante la crisis de oferta de la **zafra 2025**.

1.6.2. Objetivos Específicos

Para dar cumplimiento al objetivo general, se han definido los siguientes objetivos específicos:

1. Estructurar un sistema de variables fundamentales que integre determinantes físicos y factores macro-climatológicos bajo la teoría de la financiarización.
2. Mitigar la complejidad paramétrica del bloque financiero mediante PCA, aislando la señal del riesgo climático frente al ruido especulativo.
3. Identificar la estructura de cointegración mediante el procedimiento de Johansen, validando la estabilidad del sistema de precios.
4. Cuantificar la elasticidad del precio y el efecto sustitución con el mercado de Robusta integrando variables de régimen para la zafra 2025.
5. Diagnosticar la persistencia de los choques y la jerarquía de los "Tres Relojes" mediante análisis de IRF y FEVD en un horizonte extendido hasta **312 semanas**.

1.7. Planteamiento del Problema

Considerando la convergencia de la inestabilidad climática en Brasil y la creciente complejidad de los flujos de capital en los mercados de futuros, surge la siguiente interrogante central:

¿En qué medida las anomalías térmicas en las zonas productoras de Brasil y la dinámica de sustitución con el mercado de Robusta determinan la trayectoria de equilibrio del precio del café Arábica en Nueva York, una vez controlado el ruido macroeconómico global mediante técnicas de reducción de dimensionalidad?

1.8. Hipótesis de Trabajo

Para orientar el desarrollo del modelo econométrico, se plantean las siguientes hipótesis:

- **Hipótesis Principal (H_1):** Existe un vector de cointegración donde las anomalías térmicas en Brasil actúan como el **atractor dominante**, desplazando la influencia de los agregados macroeconómicos durante el ciclo de estrés hídrico 2024–2025.
- **Hipótesis Secundaria (H_2):** El mercado presenta un cambio de régimen caracterizado por una **reducción en la velocidad de ajuste (α)** del VECM post-2021, evidenciando una mayor histéresis ante choques climáticos.

1.9. Alcances y Limitaciones

1.9.1. Alcances

El presente estudio se circunscribe al análisis de los contratos de futuros de café Arábica transados en la bolsa de Nueva York (ICE), por ser el referente global para la valoración de este activo. Geográficamente, el análisis de los determinantes biofísicos se centra en **Brasil**, específicamente en las mesorregiones líderes del estado de **Minas Gerais**, dado que esta zona concentra la densidad productiva capaz de alterar la señal de precios internacional. Temporalmente, la investigación abarca un horizonte de 18 años (2008–2025), capturando la transición hacia la financiarización profunda y el ciclo climático asociado a la zafra 2025.

1.9.2. Limitaciones del Estudio

El presente estudio reconoce delimitaciones que acotan el alcance de sus inferencias:

1. **Delimitación geográfica:** el análisis de choques de oferta se restringe exclusivamente a Brasil. Si bien este es el principal exportador y *price maker*, no se consideran choques climáticos simultáneos en otras regiones productoras (como Vietnam o Colombia). Esta decisión se justifica en la hegemonía brasileña como principal motor de la volatilidad sistémica.
2. **Frecuencia de datos:** el uso de periodicidad semanal es adecuado para capturar la dinámica de financiarización mediante el reporte COT. Sin embargo, esto impide el análisis de la microestructura del mercado y de la volatilidad *intra-day*, elementos relevantes para estrategias de *high-frequency trading* que exceden el propósito de este análisis estructural.

3. **Simplificación de variables exógenas:** el modelo asume que el impacto climático se manifiesta principalmente a través de anomalías de temperatura y precipitación. Se omiten otras variables agronómicas complejas, como la incidencia de plagas o cambios en la densidad de fertilización por costos de insumos, asumiendo que estas dimensiones son capturadas indirectamente por las variables de productividad y costos incluidas.

Capítulo 2

Estado del Arte

2.1. Naturaleza Económica del Activo: El Café Arábica como Activo Agro-financiero

Para desentrañar la dinámica de precios objeto de estudio, es imperativo abordar el café Arábica no solo como un bien de consumo, sino como un **activo agro-financiero de alta complejidad**. Su cotización responde a una intersección específica entre la fisiología vegetal, la geopolítica de suministros y los flujos de capital global.

2.1.1. De Commodity Agrícola a Estándar Global: El Rol de la ICE

Históricamente, el café evolucionó de un bien suntuario a un componente central del comercio transoceánico, consolidando su transformación en *commodity* mediante la estandarización industrial (International Coffee Organization, 2023). La génesis de los mercados de futuros modernos permitió mitigar problemas de asimetría de información y calidad mediante contratos estandarizados.

En la actualidad, el contrato de futuros “C” de la *Intercontinental Exchange* (ICE) en Nueva York actúa como el **benchmark global de precios**. Este mecanismo garantiza la fungibilidad del activo mediante una clasificación rigurosa de grados, humedad y procedencia geográfica, permitiendo que el café se transaccione como un título financiero líquido, relevante para la estabilidad de las balanzas comerciales de economías en desarrollo como Brasil (Chen y Rogoff, 2003; Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2024).

2.1.2. La Teoría del Almacenamiento y la Formación de Expectativas

La formación de precios en el mercado de futuros se fundamenta en la **Teoría del Almacenamiento** (*Theory of Storage*) (Brennan, 1958; Working, 1949). Según esta premisa, la relación entre el precio actual y el futuro está mediada por el nivel de existencias físicas o *stocks*.

Como sostienen (Fama y French, 1987) y (Gorton, Hayashi, y Rouwenhorst, 2013), cuando los inventarios certificados caen por debajo de umbrales críticos —situación observada en los reportes recientes de la (Companhia Nacional de Abastecimento, 2024b) para la zafra 2025—, el mercado experimenta una volatilidad no lineal. Los inventarios actúan como un amortiguador ante choques exógenos; por tanto, su reducción incrementa la sensibilidad del precio frente a anomalías climáticas en Brasil, lo que justifica la inclusión de los *stocks* como variable explicativa en la presente investigación.

2.1.3. Financiarización y el Ruido Macroeconómico

En las últimas décadas, el mercado ha trascendido la cobertura comercial (*hedging*) de productores y tostadores para entrar en un proceso de **financiarización profunda** (Irwin y Sanders, 2011; Tang y Xiong, 2012). El café ha sido integrado en carteras diversificadas por parte de fondos de pensiones y *Money Managers*, quienes operan el activo como una protección frente a la inflación o como un *proxy* de crecimiento global (Irwin, 2022; Mandle, 2021).

Este fenómeno introduce un componente de “ruido financiero” significativo, donde variables como el índice dólar (DXY) y el sentimiento de mercado (S&P 500) pueden desvincular temporalmente el precio de sus fundamentos físicos. Esta realidad sustenta metodológicamente el uso del **Análisis de Componentes Principales (PCA)** en este estudio, en tanto permite sintetizar los factores financieros altamente correlacionados y aislar en mayor medida la contribución del impacto climático frente a los flujos de capital especulativo que distorsionan la relación de equilibrio de corto plazo (Gorton y cols., 2013; Tang y Xiong, 2012).

2.2. La Transmisión del Riesgo Climático: De la Fenología a la Volatilidad de Mercado

La incorporación del cambio climático como eje central de esta investigación trasciende la narrativa ambientalista para situarse como un factor determinante del riesgo sistémico. El mercado

de futuros del café Arábica opera hoy bajo lo que (Kath, Byraredy, Mushtaq, Craparo, y Porcel, 2019) define como una “sensibilidad térmica acrecentada”, donde la variabilidad climática actúa como uno de los principales catalizadores de los *shocks* de oferta contemporáneos.

2.2.1. Vulnerabilidad Fisiológica y Ciclo de Bienalidad

El café Arábica (*Coffea arabica*) presenta una plasticidad fenológica limitada, requiriendo un nicho térmico óptimo entre 18°C y 21°C para garantizar la viabilidad del polen y el llenado del grano (Baca, Läderach, Hagggar, Schroth, y Plotkin, 2014; Bunn, Läderach, Rivera, y Kirschke, 2015). Según documenta la (Companhia Nacional de Abastecimento, 2024b), la producción brasileña se rige por un ciclo de bienalidad, donde años de alta carga productiva son seguidos por periodos de recuperación vegetativa.

Sin embargo, el cambio climático ha comenzado a distorsionar este patrón. Eventos de estrés abiótico, como las anomalías térmicas superiores a los 30°C registradas en los periodos de floración de Minas Gerais, provocan el aborto floral y el decaimiento de los frutos en etapa de “chumbinho” (Della Peruta, Dos Santos, De Oliveira, y Alvarenga, 2025; Geropoulos, Marengo, y Dias, 2020). Para la zafra 2024/25, la (Companhia Nacional de Abastecimento, 2024b) reporta que, a pesar de un incremento del 1.5 % en el área en producción de Arábica, las condiciones climáticas adversas han erosionado el potencial productivo, forzando al mercado a depender de la resiliencia del café Conilon (Robusta), cuya producción ha mostrado un crecimiento del 3.3 % ante condiciones térmicas más hostiles (Companhia Nacional de Abastecimento, 2024b; Pinto-Rodriguez, Martinez-Hernández, y López-García, 2019).

2.2.2. Relevancia para la Ingeniería Comercial: El Clima como Shock de Información

Desde la perspectiva de la Ingeniería Comercial y la gestión financiera, el cambio climático puede entenderse como un **shock de información asimétrica**. La vulnerabilidad física descrita se traduce en una volatilidad no lineal en la Intercontinental Exchange (ICE) de Nueva York (MacCuaig, 2021). Dado que el mercado de futuros opera como un mecanismo de descubrimiento de precios, las noticias sobre anomalías térmicas en Brasil se procesan como señales de escasez futura mucho antes de la cosecha física.

La literatura reciente sugiere que ignorar la variable climática en modelos de corto plazo conduce a un sesgo de estimación relevante (Rivera Silva y Ramírez, 2013; Salomão, 2021). Al integrar

anomalías térmicas y pluviométricas en un sistema VECM, esta investigación internaliza una externalidad biológica, incorporando datos meteorológicos como variables predictivas de la solvencia y el riesgo de mercado. Como sostiene (Kath y cols., 2019), en un entorno de inventarios críticos (Theory of Storage), la “prima por riesgo climático” puede llegar a convertirse en un componente dominante del precio en periodos de crisis, superando transitoriamente a los fundamentos macroeconómicos tradicionales.

2.3. Revisión de la Literatura Econométrica y sus Limitaciones

El estado del arte actual presenta una bifurcación metodológica entre los modelos econométricos estructurales y la evidencia agronómica causal.

2.3.1. Modelos Econométricos Estructurales: La Ceguera Climática

La literatura econométrica ha priorizado explicar el precio del café mediante variables macroeconómicas. Un exponente clave es el modelo de Nava (2018), que explica el precio internacional basándose en costos (petróleo, fertilizantes), oferta (producción de Brasil, Vietnam, Colombia) y variables financieras (tasas de cambio).

Si bien modelos como el de Nava reportan un alto poder explicativo ($R^2 > 0.90$), presentan una omisión fundamental: la exclusión de variables climáticas directas. Esta carencia limita la capacidad del modelo para capturar *shocks* de oferta intensos, que son una de las principales fuentes de volatilidad histórica (Vollmer y Teusan, 2019). Además, el uso de variables macroeconómicas altamente correlacionadas (como índices bursátiles y tasas de interés) suele generar problemas de multicolinealidad, un desafío que esta investigación abordará mediante técnicas de reducción de dimensionalidad (PCA).

2.3.2. Crítica al Canal de Incentivos (Exchange Rate Pass-Through)

Aunque la literatura estructural incluye la tasa de cambio (BRL/USD), a menudo omite el mecanismo de transmisión subyacente (Valdes, 2020). La teoría del *Exchange Rate Pass-Through* (ERPT) incompleto en Brasil sugiere que una depreciación del Real aumenta el margen de rentabilidad del productor en moneda local, incentivando la exportación (Lawal, Kana, y Olawande, 2015; Vieira, 2021). Sin embargo, este canal de rentabilidad opera condicionalmente a la capacidad productiva física; una depreciación no puede incrementar la oferta si una helada ha destruido la

cosecha, lo que refuerza la necesidad de integrar ambas dimensiones.

2.4. La Evidencia Agronómica y el Ciclo Fenológico

Paralelamente, la literatura agronómica ha demostrado la relevancia causal del clima sobre la producción, y, por extensión, sobre los precios, cubriendo en parte el vacío dejado por los modelos exclusivamente macroeconómicos.

2.4.1. El Impacto de Shocks Climáticos Extremos

Estudios como el de Salomão (2021) identifican los eventos climáticos extremos, específicamente las heladas (*geadas*), como los principales impulsores de los picos de precios. Eventos históricos como la helada de 1994 (que afectó al 30 % del área cultivada) y la de 2021 demuestran que el clima es un determinante fundamental de la oferta, y no un mero ruido estadístico (MacCuaig, 2021).

2.4.2. El Ciclo Fenológico y el “Mercado Climático”

La evidencia indica que el impacto del clima depende críticamente de la etapa fenológica del cultivo (Geropoulos y cols., 2020). El ciclo del café Arábica en Brasil presenta ventanas de vulnerabilidad específicas: riesgo de sequía durante la floración (septiembre–noviembre) y riesgo de heladas durante la cosecha (mayo–septiembre) (Messina, Teixeira, y Mesquita, 2017). Este calendario genera un “mercado climático” (*weather market*), donde los operadores de futuros anticipan riesgos estacionales, lo que justifica la inclusión de variables climáticas con rezagos específicos en el modelo econométrico.

2.5. La Financiarización como Nuevo Determinante

Finalmente, la literatura moderna señala que los precios de los *commodities* ya no responden exclusivamente a fundamentos físicos. El proceso de financiarización ha incrementado la correlación entre el café y otros activos de riesgo (Irwin y Sanders, 2011; Mandle, 2021).

Sin embargo, la incorporación empírica de esta dimensión enfrenta una restricción de datos: el reporte *Commitment of Traders* (COT) de la CFTC, estándar para medir la especulación, posee periodicidad semanal (Irwin, 2022). Esta limitación ha impedido que estudios diarios capturen este

componente, obligando a una elección metodológica entre granularidad temporal y completitud estructural.

2.6. Síntesis Crítica y Brecha de Conocimiento

El análisis del estado del arte revela una clara brecha de síntesis. Existen modelos econométricos robustos pero climáticamente ciegos, y evidencia agronómica causal que carece de integración sistémica (Wang, Zhang, y Liu, 2025). A esto se suma la necesidad de incorporar de forma explícita la dimensión financiera de la especulación (Mandle, 2021).

La presente investigación busca contribuir a llenar esta brecha desarrollando un modelo de Vector de Corrección de Errores (VECM) que sintetice estas tres corrientes: integrando variables climáticas fenológicamente relevantes, controles estructurales de costos y variables de financiarización, bajo un marco de cointegración que reduzca el riesgo de regresión espuria (Engle y Granger, 1987; Granger y Newbold, 1974).

2.7. Introducción Analítica

La literatura académica sobre precios del café Arábica en mercados internacionales presenta una brecha epistemológica que ha sido relativamente poco explorada. Por un lado, los economistas desarrollan modelos econométricos sofisticados (VECM, ARDL) que identifican con precisión técnica las relaciones de largo plazo entre variables macroeconómicas y precios, pero omiten sistemáticamente los determinantes climáticos directos de la oferta. Por otro lado, agrónomos, climatólogos y fisiologistas vegetales han documentado exhaustivamente, con precisión biofísica, el impacto causal de eventos climáticos extremos (heladas, sequías) sobre la producción, especificando elasticidades cuantificadas, umbrales críticos de daño y mecanismos fisiológicos de transmisión. Sin embargo, estos hallazgos permanecen, en gran medida, fuera de los marcos econométricos multivariados de cointegración.

Ambas corrientes son metodológicamente sólidas en sus áreas de especialidad, pero estructuralmente incompletas para modelar la determinación real de precios del café. El presente capítulo desarrolla una síntesis crítica de esta bifurcación disciplinaria, integrando hallazgos de múltiples disciplinas en un marco analítico unificado que identifique y justifique la resolución de brechas metodológicas específicas.

2.8. La Corriente Econométrica: Sofisticación Técnica y Limitaciones Sistemáticas

2.8.1. Consenso Metodológico en Econometría de Commodities

La econometría de *commodities* ha consolidado dos aproximaciones complementarias: VECM (vector error correction model) y ARDL bounds testing Pesaran y Shin (2001). Ambas, fundamentadas en la teoría de cointegración de Engle y Granger (1987), permiten identificar relaciones estables entre variables no estacionarias, distinguiendo el equilibrio estructural de largo plazo de las dinámicas transitorias de corto plazo.

La ventaja metodológica de ARDL bounds testing es su flexibilidad: permite trabajar simultáneamente con variables de diferentes órdenes de integración ($I(0)$ e $I(1)$) sin requerir pretesting de estacionariedad, reduciendo el tamaño de muestra necesario en comparación con procedimientos de Johansen en VECM.

Evidencia empírica. Amin, Thawesaengskulthai, Rittenberg, McNew, y Reuteman (2009) aplicaron ARDL para analizar precios futuros de maíz y soja en Brasil (1990–2008), identificando cointegración entre precios domésticos, tipo de cambio BRL/USD e índices de precios internacionales. Las elasticidades de largo plazo estimadas fueron: tipo de cambio -0.76 e inflación internacional $+0.82$, demostrando integración funcional de mercados mediante mecanismos de arbitraje.

Para café específicamente, Vollmer y Teusan (2019) desarrollaron un modelo Markov-switching VECM que identificó dos regímenes dinámicos: régimen 1 (65 % del tiempo) con precios laterales y volatilidad moderada (8–12 %), con relaciones de cointegración fuertes; y régimen 2 (35 % del tiempo) con picos de precios, volatilidad elevada (25–45 %) y relaciones de cointegración que persisten. Este resultado sugiere que la volatilidad de corto plazo es en buena medida transitoria, mientras las relaciones fundamentales de equilibrio mantienen validez incluso durante episodios de tensión.

El Modelo de Nava (2018): Estado del Arte Contemporáneo

Como se mencionó en la Sección 2.3.1, Nava (2018) representa un exponente central de la corriente econométrica estructural aplicada al café. Su modelo explica el precio internacional a partir de costos (petróleo, fertilizantes), oferta (producción de Brasil, Vietnam, Colombia) y variables financieras (tasa de cambio, tasas de interés), alcanzando un poder explicativo elevado ($R^2 > 0.90$).

No obstante, más allá de su buen ajuste, el enfoque de Nava adolece de tres limitaciones críticas para el periodo reciente: (i) trata la producción como prácticamente exógena, abriendo espacio a

problemas de endogeneidad cuando el clima afecta simultáneamente oferta y precios; (ii) es poco sensible a los eventos extremos al omitir variables climáticas directas e inventarios certificados, que son precisamente los canales a través de los cuales se materializan los *shocks* de oferta más severos; y (iii) no modela de forma explícita la interacción entre el canal cambiario (*exchange rate pass-through*) y la capacidad productiva física, pese a que una depreciación del BRL no puede aumentar la oferta si la cosecha ha sido destruida por una helada o una sequía prolongada.

El marco VECM propuesto en este seminario se diseña precisamente para responder a estas tres brechas: endogeneiza la dinámica conjunta de precios, inventarios, tipo de cambio y especulación; integra anomalías térmicas y pluviométricas como variables climáticas exógenas; y permite capturar la interacción entre el pass-through cambiario y la capacidad productiva física a través del vector de cointegración y los términos de corrección de error.

2.8.2. Las Limitaciones Fundamentales: Omisión Sistemática de Determinantes Climáticos

A pesar de la sofisticación econométrica, persiste una **brecha importante**: la omisión casi universal de variables climáticas como determinantes causales directos de la oferta.

Primera limitación: endogeneidad no reconocida

La variable “producción brasileña de café” es endógena, determinada causalmente por condiciones climáticas rezagadas (heladas, sequías, balance hídrico fenológico). Al incluir producción rezagada sin modelar explícitamente sus determinantes climáticos, se introduce una fuente de variable omitida sistemática: el efecto causal clima $\rightarrow$ producción $\rightarrow$ precio se absorbe en el término de error, permaneciendo sin identificación precisa.

Segunda limitación: invisibilidad de eventos extremos

Los eventos climáticos extremos constituyen el mecanismo causal primario de muchos picos históricos de precios. **Helada de julio 2021**: temperaturas mínimas cercanas a -1.2°C destruyeron una fracción relevante del parque productivo, estimada en varios millones de sacos, con impactos significativos sobre el Cerrado Mineiro. Los precios futuros se incrementaron en un orden de magnitud cercano a $+13\%$ en pocas semanas, alcanzando máximos de varios años (MacCuaig, 2021).

Sequía 2024–2025: precipitaciones en octubre de 2024 se situaron muy por debajo del promedio histórico durante la floración, generando un ajuste al alza de los precios de futuros que

alcanzaron máximos de más de una década. El mecanismo subyacente es clima $\rightarrow$ proyección de oferta $\rightarrow$ volatilidad de precios anticipatoria, pero en modelos convencionales este proceso queda reflejado principalmente en los residuos, sin una cuantificación estructural explícita.

Tercera limitación: interacción no modelada

Valdes (2020) documentaron que la depreciación de la moneda brasileña incrementa los ingresos en moneda local de exportadores cuando los precios internacionales permanecen constantes, incentivando la expansión de oferta mediante el “canal de rentabilidad”. Sin embargo, este canal opera condicionalmente a la capacidad productiva física disponible. Una depreciación que incentive expansión de oferta no puede ejecutarse si una helada destruyó botones florales o si una sequía limitó el desarrollo del fruto. El tipo de cambio es necesario pero no suficiente. Los modelos que incluyen tipo de cambio sin variables climáticas omiten una interacción crítica.

Adicionalmente, una limitación recurrente en la literatura econométrica estructural es la dificultad para integrar simultáneamente múltiples indicadores financieros globales (como índices bursátiles, tasas de interés y fortaleza del dólar). Debido a la alta covarianza existente entre estos activos —fenómeno conocido como “risk on / risk off”—, su inclusión conjunta suele generar problemas severos de multicolinealidad, afectando la estabilidad y la interpretación de los parámetros del VECM. Esto ha forzado a investigadores previos a seleccionar arbitrariamente un único *proxy* de demanda, descartando información relevante sobre el apetito de riesgo global con el fin de preservar la robustez estadística del modelo. Esta investigación abordará esta limitación mediante el análisis de componentes principales (PCA).

2.9. La Corriente Agronómica: Precisión Causal Sin Integración Econométrica

2.9.1. Elasticidades Cuantificadas de Impacto Climático

Wang y cols. (2025) realizaron un estudio pionero usando modelos aditivos generalizados (GAMs) no paramétricos con datos fenológicos de Yunnan, China (1990–2022), evaluando elasticidades no lineales de rendimiento:

- **Estrés por frío:** el rendimiento disminuye 18.9% por cada 1 °C de disminución en temperatura mínima diaria durante maduración (mayo–junio), reflejando la vulnerabilidad fisiológica

del Arábica.

- **Estrés hídrico:** el rendimiento disminuye 4.0 % por cada aumento de 0.1 kPa en déficit de presión de vapor (VPD) durante floración.
- **Umbrales no lineales:** Kath y cols. (2019) revelaron que caídas pronunciadas ocurren cuando la temperatura máxima excede 29.22 °C durante floración o cuando VPD alcanza 0.82 kPa durante fijación de frutos.

Implicación econométrica: los modelos econométricos lineales sin especificación de no linealidades estarían mal especificados en regiones de estrés severo, tendiendo a subestimar las elasticidades efectivas.

2.9.2. Ciclo Fenológico como Estructura de Vulnerabilidad

El café Arábica exhibe un ciclo fenológico bienal con vulnerabilidades estacionales diferenciadas. **Floración (septiembre–octubre):** las yemas florales requieren estrés hídrico moderado seguido de precipitación; un déficit excesivo causa aborto masivo de botones florales. **Crecimiento del fruto (diciembre–marzo):** fase de máxima demanda hídrica; un déficit severo provoca aborto de frutos y malformación de grano.

Messina y cols. (2017) calibraron modelos econométrico-agronómicos integrando balance hídrico fenológico, obteniendo coeficientes altamente significativos ($p < 0.01$) con elasticidad rendimiento–precipitación de 0.25 y errores porcentuales absolutos medios ≤ 2.9 %, demostrando la viabilidad de integrar variables climáticas en marcos econométricos rigurosos.

Maduración y cosecha (abril–septiembre): el exceso de precipitación favorece la Roya (*Hemileia vastatrix*). Heladas (temperatura < 0 °C) causan destrucción inmediata, daño estructural e **impacto multianual crítico:** temperaturas durante agosto–septiembre afectan botones florales en dormancia, causando aborto masivo y reducciones de producción del orden de 30–50 % en la campaña siguiente.

2.9.3. Rezagos Temporales Multianuales

La helada de julio de 2021 ilustra la estructura multianual de rezagos: (i) en agosto–septiembre 2021 se observa una reducción inmediata de la cosecha; (ii) entre diciembre 2021 y marzo 2022, los precios incorporan un *premium* vinculado a la destrucción de botones para la floración 2021; (iii) en

el período 2022–2024 se registran *off-years* amplificados y una posterior recuperación gradual. Este ejemplo demuestra que modelos con producción rezagada capturan parcialmente el efecto, pero no la estructura causal completa.

2.10. Economía del Almacenamiento: Fundamento para Inclusión de Stocks ICE

2.10.1. Teoría Clásica del Almacenamiento

La relación entre inventarios físicos y precios se fundamenta en la teoría de Working (1949) y Keynes (1930), formalizada por Fama y French (1987). La relación de no arbitraje fundamental es:

$$P_f(t, T) = P_s(t) \times e^{(r+u-y) \cdot T} \quad (2.1)$$

donde $P_f(t, T)$ es el precio futuro, $P_s(t)$ es el precio *spot*, r es la tasa de interés, u es el costo de almacenamiento/seguro, y es el *convenience yield* y T es el tiempo hasta vencimiento.

El **convenience yield** es la variable de equilibrio crucial: cuando los inventarios son abundantes, $y \approx 0$; cuando los inventarios caen bajo umbrales críticos, y aumenta significativamente. Un aumento en y comprime los *spreads* forward (el *contango* se reduce o se invierte a *backwardation*).

Indicadores recientes de mercado para café (noviembre 2025):

Cuadro 2.1: Indicadores de mercado de café: situación reciente vs. rangos históricos

Indicador	Situación reciente	Rango histórico (aprox.)
Inventarios ICE certificados	~430,000 sacos	2–4 millones sacos (2015–2020)
Stock-to-use ratio	~8–10 %	18–24 %
Estructura de precios	Backwardation –5 % a –8 %	Contango +8–+12 %

2.10.2. Dinámicas No Lineales del Convenience Yield

Gorton y cols. (2013) desarrollaron modelos donde el *convenience yield* es función no lineal decreciente del nivel de inventarios:

$$y(I) = \psi \times I^{-\gamma} \quad (2.2)$$

donde $\gamma > 0$ (típicamente 1.0–2.0) implica que el *convenience yield* aumenta de forma acelerada cuando los inventarios declinan hacia umbrales críticos. De ello se desprende que:

$$\varepsilon_{P,Y} \approx \beta \times I(t)^{-\alpha} \quad (2.3)$$

Cuando los inventarios se contraen desde niveles intermedios a niveles bajos, la elasticidad del precio respecto a *shocks* de oferta puede duplicarse o triplicarse.

Cuantificación empírica cualitativa para café 2024–2025: con abundancia de inventarios (2015–2020), un *shock* de oferta de -12.5% se asocia históricamente a aumentos de precios del orden de $+12.5\%$ a $+18.75\%$. Con inventarios en mínimos (2024–2025), *shocks* de magnitud comparable se vinculan a alzas del orden de $+35$ a $+40\%$. Esta diferencia es consistente con las dinámicas no lineales predichas por la teoría.

2.10.3. Stocks ICE como Variable Explicativa

Los *stocks* certificados ICE constituyen una variable explicativa central: (i) su relevancia causal está claramente establecida en la teoría del almacenamiento; (ii) la elasticidad esperada del precio frente a variaciones en inventarios es no lineal; (iii) su evolución refleja tanto el balance físico como decisiones de almacenamiento, concentrando información agregada sobre la escasez relativa; y (iv) su impacto puede variar según el horizonte temporal y la proximidad al vencimiento de los contratos. Estos elementos justifican su incorporación explícita en el sistema VECM.

2.11. El Impacto de la Financiarización y la Especulación

2.11.1. Definición y Evolución

La **financiarización de *commodities*** se refiere al proceso mediante el cual contratos de futuros, históricamente diseñados como mecanismo de cobertura de riesgo, se transforman progresivamente en activos financieros operados por inversores especulativos sin exposición física directa.

Transformación estructural post-2004: Irwin y Sanders (2011) identificaron un quiebre estructural en 2004. Período pre-2004: especulación residual; liquidez principalmente de *hedgers*. Período 2004–2011: flujos masivos de capital financiero; activos bajo administración crecieron de USD 13–15 mil millones a USD 450–500 mil millones. Período post-2012: la participación especulativa se estabilizó en torno a 40–50% del *open interest*.

2.11.2. Mecanismos de Amplificación de Volatilidad

Canal 1: efecto multiplicador de demanda especulativa. Un *shock* climático reduce oferta en $X\%$. Sin especulación, el aumento de precios sería comparable a $X\%$. Con especuladores, la demanda especulativa se suma a la demanda física, amplificando el movimiento de precios.

Cuantificación (Mandle (2021)): baja participación especulativa: *shock* -10% oferta $\rightarrow$ cambio de precio $\approx -10\%$ (elasticidad ≈ -1.0). Alta participación especulativa: *shock* -10% oferta $\rightarrow$ cambio de precio -20% a -25% (elasticidad ≈ -2.0 a -2.5). **Amplificación:** factor aproximado de 2.0 – $2.5\times$.

Canal 2: dinámicas de *momentum*. Aumentos iniciales de precio atraen nuevos compradores que refuerzan la tendencia, generando retroalimentación positiva y mayor volatilidad.

Canal 3: comportamiento de rebaño. Especuladores bajo restricciones de riesgo similares (por ejemplo, *value-at-risk*) tienden a reposicionarse de forma simultánea, amplificando movimientos de precio.

2.11.3. Reporte COT como Medida Operacional

El reporte **Commitment of Traders (COT)** publicado semanalmente clasifica a los participantes en comerciantes (cobertura física) y no comerciantes (especuladores). La **posición neta** se define como:

$$NCI_t = \text{Long}_{\text{NonCommercial}} - \text{Short}_{\text{NonCommercial}} \quad (2.4)$$

Un NCI_t elevado refleja posiciones netas compradoras por parte de los especuladores (expectativas de alzas). Para café Arábica, posiciones netas han alcanzado máximos históricos recientes, con $NCI_t > 50.000$ contratos (del orden de 15 – 20% del *open interest* total).

No obstante, la incorporación empírica y rigurosa de esta dimensión especulativa enfrenta una restricción de datos fundamental: el reporte COT de la CFTC, estándar global para medir el posicionamiento neto de los fondos de inversión (*Money Managers*), posee una periodicidad exclusivamente semanal (Irwin, 2022). Esta limitación estructural ha impedido históricamente que los estudios de alta frecuencia (diarios) capturen con rigor el componente especulativo, obligando a una elección metodológica entre la granularidad temporal y la completitud estructural del modelo.

2.12. Mecanismo de Transmisión Cambiaria: Exchange Rate Pass-Through

2.12.1. Teoría del ERPT Incompleto

El **Exchange Rate Pass-Through (ERPT)** cuantifica la elasticidad de transmisión del tipo de cambio a los precios:

$$ERPT_{LR} = \frac{\partial \ln(P_{\text{doméstico}})}{\partial \ln(\text{TC})} \quad (2.5)$$

Un $ERPT = 1.0$ indica transmisión completa; $ERPT < 1.0$ indica transmisión incompleta. **Para Brasil específicamente**, Valdes (2020) estimó $ERPT \approx 0.70$ para el café Arábica, lo que significa que una depreciación del Real de 10 % se traduce en aproximadamente 7 % de aumento en precios domésticos.

2.12.2. El “Canal de Rentabilidad”: Mecanismo Identificado

Valdes (2020) identificaron el siguiente mecanismo específico: cuando el Real se deprecia (se requieren más BRL por USD) con ERPT incompleto (0.70):

1. Los precios internacionales en USD pueden permanecer relativamente constantes.
2. Los ingresos del productor en BRL aumentan proporcionalmente a la depreciación (por ejemplo, depreciación 20 % $\rightarrow$ ingresos +20 %).
3. Los costos locales en BRL no suben en la misma proporción: con ERPT incompleto e inflación interna asociada ≈ 0.70 , los costos aumentarían solo alrededor de +14 %.
4. Resultado neto: la rentabilidad por unidad vendida se eleva, creando incentivos para expandir superficie, aplicar insumos y liquidar *stocks*.

Formalización:

$$R_t = \frac{P_t^{\text{USD}} \times e_t}{\text{Costo}_t^{\text{BRL}}} \quad (2.6)$$

donde R_t es la rentabilidad relativa, P_t^{USD} es el precio internacional, e_t es el tipo de cambio y $\text{Costo}_t^{\text{BRL}}$ recoge los costos en moneda local.

2.12.3. Interacción Crítica: ERPT y Capacidad Climática

El canal de rentabilidad opera condicionalmente a la capacidad productiva física. Una depreciación que incentive expansión no puede ejecutarse si una helada destruyó botones florales o si una sequía limitó el desarrollo del fruto. El tipo de cambio es necesario pero no suficiente, generando coeficientes heterogéneos según el régimen climático. Esta interacción refuerza la conveniencia de incorporar simultáneamente variables climáticas y cambiarias en el modelo.

2.13. Crítica Econométrica: El Problema de Regresión Espuria

2.13.1. La Sospecha de Granger–Newbold

El hallazgo de Nava (2018) reportando $R^2 = 0.975$ en una especificación en niveles plantea desafíos metodológicos. Granger y Newbold (1974) demostraron que, cuando dos series no estacionarias independientes se regresan una contra otra, el resultado típicamente arroja $R^2 \rightarrow 1.0$, estadísticos t inflados y estadísticos Durbin–Watson (DW) $\rightarrow 0$. Este fenómeno se denomina “**regresión espuria**”: ajuste estadístico excelente sin relación causal real.

En el caso del modelo de Nava: (i) todas las variables consideradas son $I(1)$; (ii) un R^2 tan elevado en presencia de múltiples regresores es inusual; y (iii) no se presenta, al menos en la documentación disponible, un análisis exhaustivo de cointegración para $n = 5$ variables. Ello sugiere la necesidad de un tratamiento más riguroso de las propiedades de las series.

2.13.2. Riesgos de Sobreajuste y Endogeneidad

Un modelo con R^2 muy cercano a 1 corre el riesgo de **sobreajustar el ruido muestral** más que capturar relaciones estructurales. Además, la inclusión de la variable “producción brasileña” de forma contemporánea introduce simultaneidad y potencial causalidad inversa, dificultando la interpretación de los coeficientes. Estas amenazas de sobreajuste y endogeneidad motivan la adopción de un marco dinámico multiecuacional, capaz de modelar simultáneamente las relaciones de largo y corto plazo entre las variables.

2.13.3. VECM como Solución Metodológica

El enfoque VECM, en la línea de Johansen (1991) y Enders (2015), está diseñado para mitigar estos problemas: (i) permite realizar pruebas rigurosas de cointegración (Johansen); (ii) separa

explícitamente las dinámicas de largo y corto plazo; (iii) facilita el testeo de exogeneidad débil; y (iv) especifica estructuras de rezagos diferenciados.

De forma esquemática, una ecuación típica de precio en el sistema podría escribirse como:

$$\Delta P_t = \alpha \beta' (P_{t-1}, TC_{t-1}, \text{Clima}_{t-(\text{rezaço})}, \text{Especulación}_{t-1}) + \sum_i \Gamma_i \Delta X_{t-i} + \varepsilon_t \quad (2.7)$$

donde β' es el vector de cointegración (relaciones de largo plazo), α recoge las velocidades de ajuste y Γ_i representa las dinámicas de corto plazo en las variables incluidas en X_t .

2.14. La Intensificación de la Volatilidad Climática y Nuevos Patrones de Riesgo (2023–2025)

La literatura reciente y los reportes técnicos oficiales evidencian un cambio en la dinámica climática del cinturón cafetero brasileño durante el trienio 2023–2025. A diferencia de patrones históricos dominados por episodios puntuales de heladas, este período se caracteriza por una sucesión de anomalías térmicas e hídricas que desafían los modelos tradicionales de previsión de cosecha.

A partir del análisis de los Boletins de Safra de la Compañía Nacional de Abastecimiento (CONAB), se identifican tres eventos disruptivos que redefinen el escenario de riesgo para el mercado del café Arábica:

2.14.1. El Estrés Térmico de 2023 y el “Falso Positivo” de 2024

El ciclo productivo 2024, correspondiente a una fase de bianualidad positiva, estuvo condicionado por las olas de calor registradas a finales de 2023. Según la **CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento, 2024a)**, las temperaturas máximas extremas en Minas Gerais durante las fases de llenado de grano limitaron el potencial productivo máximo, generando una discrepancia entre la expectativa de mercado y la realidad física del grano. Este fenómeno actuó como un *shock* de expectativas, en el que la oferta nominal ocultó vulnerabilidades fisiológicas que se reflejan en cambios en la persistencia de la volatilidad.

2.14.2. La Crisis Hídrica de Floración (septiembre 2024)

El evento más crítico para la formación de precios reciente fue la sequía prolongada iniciada en septiembre de 2024. Los datos oficiales de la **CONAB (Companhia Nacional de Abaste-**

cimento, 2025a) indican un déficit hídrico severo en la ventana fenológica de la floración para la cosecha 2025. Este evento, combinado con temperaturas superiores a los 30°C, provocó un aborto floral significativo (Della Peruta y cols., 2025). Este *shock* de oferta anticipado explica la ruptura de tendencia a finales de 2024, respaldando la hipótesis de que el mercado reacciona con mayor sensibilidad a las anomalías térmicas en ventanas críticas de desarrollo.

2.14.3. El Riesgo de Calidad por Excesos Pluviométricos (mayo 2025)

El inicio de la cosecha 2025 introdujo una dimensión adicional de riesgo: el detrimento de la calidad por precipitaciones inoportunas. Durante mayo de 2025, registros pluviales atípicos en regiones clave como la Zona da Mata y el Norte de Paraná interrumpieron las labores de recolección y secado natural (Companhia Nacional de Abastecimento, 2025b). Este fenómeno introduce un matiz fundamental en la modelación econométrica: la pluviosidad, que actúa como determinante positivo durante el desarrollo vegetativo, se transforma en un ***shock negativo de precio*** vía erosión de la “prima de calidad” cuando ocurre en la ventana de cosecha. La fermentación no deseada y la caída de frutos al suelo elevan el porcentaje de defectos, afectando la disponibilidad de café con grado de entrega ICE (Arábica Tipo 2/3), lo que presiona al alza los diferenciales de precios a pesar de la existencia de volumen físico.

En síntesis, el período 2023–2025 sugiere que la volatilidad del precio del café ha transitado desde una dependencia de eventos catastróficos binarios (como las heladas históricas) hacia una **interacción multivariada y estocástica** entre estrés térmico, déficit hídrico en floración y excesos hídricos en cosecha. Esta evolución justifica la adopción de un modelo VECM que internalice variables climáticas de mayor detalle temporal y controle por los efectos cíclicos de la bianualidad. Este enfoque permite capturar no solo la escasez de oferta bruta, sino también la vulnerabilidad de la estructura de calidad que define el equilibrio del activo en Nueva York.

2.15. Síntesis y Marco Conceptual: La Teoría de los Tres Relojes

La revisión literaria expuesta permite concluir que la formación de precios del café Arábica en el escenario actual (2024–2025) ha trascendido la capacidad de los modelos lineales univariados. Esta investigación propone unificar las corrientes analíticas bajo la **Teoría de los Tres Relojes**, una arquitectura sistémica que define el nuevo régimen de “Biologización de los Commodities”:

El Reloj Financiero: Determina la liquidez y la varianza estocástica de corto plazo. Se opera-

cionaliza mediante la financiarización y el posicionamiento de los *Money Managers* (Reporte COT). Su desincronización con los fundamentos biofísicos genera burbujas de volatilidad transitoria que deben ser filtradas mediante técnicas de reducción de dimensionalidad.

El Reloj Logístico-Climático: Define el *convenience yield* y la percepción de escasez física. Opera mediante la intersección de la fenología del cultivo y los niveles críticos de inventarios certificados en la ICE. Es el responsable de las dinámicas no lineales, la inversión de la curva de precios (*backwardation*) y los cambios de régimen.

El Reloj Estructural: Representa las relaciones de equilibrio de largo plazo y los mecanismos de transmisión macroeconómica, tales como el *Exchange Rate Pass-Through* (ERPT) y el efecto sustitución estratégica con el mercado de Robusta.

Como corolario de esta revisión, el Cuadro 2.2 sintetiza la matriz de brechas detectadas en la literatura y la resolución técnica que este seminario implementa a través de la tríada conceptual de los "Tres Relojes".

Cuadro 2.2: Matriz de brechas metodológicas y resolución mediante el enfoque de los Tres Relojes

Brecha	Problema de Investigación	Solución: Enfoque VECM-PCA
Dimensión Financiera	Ruido por financiarización y multicolinealidad macroeconómica (Irwin, 2022).	Reducción de dimensionalidad vía PCA para extraer el factor común del "Reloj Financiero".
Dimensión Logística	No linealidad del <i>convenience yield</i> ante inventarios críticos (Gorton y cols., 2013).	Inclusión de Stocks ICE como variable endógena para capturar la sensibilidad del "Reloj Logístico".
Dimensión Climática	Ceguera climática y omisión de la causalidad fenológica (Kath y cols., 2019).	Integración de anomalías térmicas e hídricas como <i>shocks</i> exógenos en ventanas críticas.
Rigor Estadístico	Regresión espuria e inconsistencia dinámica en modelos en niveles (Granger y Newbold, 1974).	Estimación de un sistema VECM para identificar el atractor de equilibrio del "Reloj Estructural".

Esta matriz constituye el puente dialéctico hacia el **Capítulo 3: Marco Metodológico**, donde se formaliza la especificación matemática del modelo VECMX y la estrategia de identificación empírica necesaria para validar la hipótesis de la biologización.

Capítulo 3

Marco Metodológico

3.1. Diseño de la Investigación y Estrategia de Identificación

La presente investigación adopta un diseño de carácter **explicativo y relacional**, con un enfoque cuantitativo, no experimental y longitudinal. El marco metodológico se fundamenta en la econometría de series de tiempo multivariadas, diseñada específicamente para capturar la dinámica de equilibrio y los mecanismos de ajuste en mercados de materias primas altamente financiarizados.

El diseño responde al desafío central identificado en el Estado del Arte: la necesidad de integrar la evidencia agronómica causal con la modelación estructural de precios. Para operacionalizar este objetivo y superar las limitaciones de especificación detectadas en la literatura previa —como el sesgo por omisión de variables o la inestabilidad de parámetros—, se ha definido una estrategia de identificación basada en el **principio de parsimonia**. Esta estrategia se articula en tres decisiones críticas:

3.1.1. Resolución de la “Maldición de la Dimensionalidad”

La modelación del mercado del café implica un espacio de variables teóricamente relevantes de alta dimensión ($k > 15$), abarcando determinantes climáticos, macroeconómicos y de posicionamiento especulativo. En un marco de vectores autorregresivos (VAR/VECM), la inclusión irrestricta de todos estos determinantes generaría una **expansión paramétrica** ($k^2 \times p + \text{constantes}$), donde p representa el orden de rezagos. Este fenómeno agotaría los grados de libertad, incrementando los errores estándar de las estimaciones y comprometiendo la potencia de los tests de cointegración (Johansen, 1988).

Para mitigar este riesgo, se implementa un **proceso escalonado de selección** econométrica:

1. **Selección de fundamentos *upstream*:** en lugar de utilizar variables genéricas de costo, se incorporan como proxy los **precios stock CF Holding Industries Inc.** Dado que el nitrógeno es el insumo más crítico para la productividad del cafeto y representa una parte sustancial del Custo Operacional Efetivo (COE) reportado por la (Companhia Nacional de Abastecimento, 2024b), esta variable permite capturar de forma más directa la presión de costos, evitando la imprecisión de emplear el petróleo como único *proxy*.
2. **Reducción factorial (PCA):** se recurre al Análisis de Componentes Principales para consolidar la información de los activos financieros globales (S&P 500, DXY, T10) en factores sintéticos, de modo que el sistema final mantenga la parsimonia sin prescindir de la información relevante sobre el entorno macro-financiero.

3.1.2. Especificación del Sistema Endógeno y Exógeno

Bajo una arquitectura de equilibrio general para commodities, se define un sistema central de nueve variables endógenas, organizadas en bloques de fundamentos de mercado (*log_cafe*, *log_rob*, *log_stocks*), factores financieros (*log_brl*, *Net_Position*, *PC1*, *PC2*) y costos de insumos (*log_wti*, *log_nfpi*). Este sistema interactúa dinámicamente, permitiendo capturar no solo la cointegración de los precios en el largo plazo, sino también el 'pass-through' de costos y la influencia de la liquidez global.

A diferencia del sistema endógeno, las anomalías climáticas (*Anom_Temp* y *Anom_Prec*) se incorporan como un bloque de variables estrictamente exógenas. Esta separación es fundamental para la identificación del modelo VECMX, ya que permite aislar los choques meteorológicos estocásticos de la dinámica endógena de precios. De este modo, se facilita la observación de efectos puros mediante funciones de impulso-respuesta, garantizando que las perturbaciones climáticas actúen como drivers de volatilidad externos que no se ven afectados por las fluctuaciones de mercado.

3.1.3. Consistencia Temporal y Frecuencia de la Muestra

Se utiliza una muestra de **938 observaciones semanales**, abarcando desde enero de 2008 hasta diciembre de 2025. Esta frecuencia es más informativa que la mensual para capturar la volatilidad climática y financiera, pero evita el ruido de microestructura de los datos diarios, contribuyendo a la estabilidad estadística del modelo.

3.1.4. Definición de la Frecuencia: El Imperativo de la Especulación

Se establece una **frecuencia semanal** para todas las series de tiempo del sistema. Esta decisión es metodológicamente vinculante y responde a dos criterios fundamentales de consistencia estructural:

1. **Captura de la financiarización:** la distinción entre volatilidad fundamental y especulativa es crítica en el análisis moderno de *commodities*. El indicador estándar para medir el posicionamiento neto de los *Money Managers*, proveniente del reporte *Commitment of Traders* (COT) de la CFTC, se publica con una periodicidad exclusivamente semanal. La adopción de un modelo diario requeriría la interpolación artificial de estos datos o su exclusión, lo cual introduciría un sesgo potencialmente severo por variable omitida en la dimensión de la financiarización.
2. **Optimización de la relación señal-ruido:** dado que el objetivo es estimar vectores de cointegración (relaciones de equilibrio de largo plazo), la agregación semanal actúa como un **filtro de paso bajo**, atenuando el ruido estocástico de alta frecuencia y la volatilidad de microestructura (*noise trading*) propia de los datos diarios. Esto permite una detección más nítida de las tendencias comunes y de las relaciones de arbitraje entre Árbitra y Robusta.

3.1.5. Ortogonalización de Riesgos Financieros (PCA)

Para abordar los problemas de identificación derivados de la elevada colinealidad entre los activos financieros, se aplicará un Análisis de Componentes Principales (PCA) sobre las series de $\ln(\text{S\&P500})$, $\ln(\text{DXY})$ y $\ln(\text{T10})$. Este procedimiento de **reducción factorial** transforma un conjunto de variables correlacionadas en un sistema de vectores ortogonales, lo que permite preservar la parsimonia del modelo VECM y reducir la multicolinealidad sin sacrificar información esencial.

La selección del número de componentes retenidos se basará en criterios estándar de la literatura: proporción mínima de varianza explicada acumulada y análisis del *scree plot*, asegurando que la mayoría de la variabilidad del bloque financiero quede capturada por un número reducido de factores. Los resultados específicos de la descomposición, así como las cargas (*loadings*) de cada variable, se presentan y discuten en el capítulo de resultados.

Conceptualmente, estos factores se interpretan como:

- **Factor 1 (sentimiento de mercado y liquidez):** asociado a combinaciones de S&P 500

y DXY, sintetiza el apetito global por riesgo y el ciclo de liquidez del dólar, es decir, el canal a través del cual los flujos financieros influyen en la cotización del café como activo de riesgo/refugio.

- **Factor 2 (costo de capital):** relacionado principalmente con la tasa del Tesoro a 10 años (T10), resume el impacto de la política monetaria de la Reserva Federal y del costo de oportunidad del capital, variables clave para la teoría del almacenamiento y el *cost of carry* de los inventarios certificados.

Al incorporar estos índices financieros sintéticos en el VECM, el modelo retiene la información macroeconómica global relevante, al tiempo que reduce la inestabilidad de la matriz de varianza-covarianza asociada a la multicolinealidad entre las variables originales.

3.1.6. Inclusión de la Teoría del Almacenamiento

A diferencia de los modelos de precios de forma reducida, esta investigación incorpora explícitamente los **inventarios certificados (stocks)** de la ICE como una variable endógena fundamental. Esta decisión permite operacionalizar empíricamente la **Teoría del Almacenamiento** (Brennan, 1958; Working, 1949).

Dentro de la arquitectura del modelo, los niveles de inventario actúan como el vínculo entre la disponibilidad física y la formación de expectativas financieras. Bajo esta premisa, los *stocks* cumplen una doble función:

- **Amortiguador de *shocks*:** actúan como estabilizador físico ante anomalías climáticas en Brasil. Una baja disponibilidad de inventarios incrementa la sensibilidad del precio ante noticias de sequía o heladas, fenómeno que el modelo recoge en la relación de largo plazo entre precio e inventarios y en la dinámica de ajuste.
- ***Convenience yield*:** la inclusión de los inventarios permite capturar de forma implícita el beneficio de mantener el activo físico. Niveles críticamente bajos de *stocks* —como los observados en los reportes recientes (Companhia Nacional de Abastecimento, 2025a)— se asocian a ajustes de precio más que proporcionales ante cambios en la oferta, en línea con la evidencia de respuestas no lineales prevista por la teoría.

Esta especificación busca que el modelo respete la restricción de equilibrio físico que gobierna

los mercados de *commodities* agrícolas, y no se limite a correlaciones estadísticas en ausencia de fundamentos.

3.2. Selección, Tratamiento y Definición de Datos

La base de datos final se compone de un sistema de periodicidad semanal ($n = 938$ observaciones), abarcando desde la segunda semana de enero de 2008 hasta el cierre de diciembre de 2025. La construcción de este conjunto de datos responde a la necesidad de capturar tanto la dinámica de los fundamentos biofísicos como la interacción con los mercados financieros globales.

El modelo *Vector Error Correction* (VECM) se especifica mediante un sistema de **9 variables endógenas** (y_t), que interactúan dinámicamente en el largo plazo, y un bloque de **variables exógenas determinísticas** (x_t) que capturan los choques climáticos y los ciclos fisiológicos.

3.2.1. Especificación y Taxonomía del Sistema de Variables (y_t, x_t)

Para garantizar la plena consistencia técnica y facilitar la trazabilidad entre el planteamiento teórico, el análisis de resultados y la implementación computacional, se presenta la Tabla 3.1. Esta matriz actúa como un puente terminológico que vincula los símbolos matemáticos de las ecuaciones del sistema VECMX con sus definiciones conceptuales y sus correspondientes identificadores técnicos en el lenguaje de programación R.

Cuadro 3.1: Matriz de Correspondencia: Teoría, Concepto y Nomenclatura Programática

Símbolo Teórico	Concepto / Variable Legible	Identificador en R
<i>Bloque de Variables Endógenas (y_t)</i>		
P_t	Precio Futuro Café Arábica (log)	log_cafe
I_t	Inventarios Certificados ICE (log)	log_stocks
NP_t	Posición Neta Especuladores (COT)	Net_Position
R_t	Precio Futuro Café Robusta (log)	log_rob
E_t	Tipo de Cambio BRL/USD (log)	log_brl
$F_{1,t}$	Factor de Riesgo Global (PC1)	PC1
$F_{2,t}$	Factor de Costo de Capital (PC2)	PC2
W_t	Precio Petróleo WTI (log)	log_wti
C_t	Proxy de Fertilizantes (CF stock) (log)	log_nfpi
<i>Bloque de Variables Exógenas (x_t / d_t)</i>		
$X_{1,t}$	Anomalía Térmica Estandarizada	anom_temp
$X_{2,t}$	Anomalía Pluviométrica Estandarizada	anom_prec
$D_{j,t}$	Bloque de 10 Variables de Intervención	d_[evento]

En términos de trazabilidad, las series de precios de los futuros de café Arábica (KC=F) y Robusta (LRC=F), del índice S&P 500, del índice dólar (DXY) se obtienen desde *Yahoo Finance* mientras que el precio stock CF de *investing.com*. La tasa de cambio BRL/USD, la tasa de los bonos del Tesoro estadounidense a 10 años (T10) y el precio del petróleo WTI provienen de la base *Federal Reserve Economic Data* (FRED). Las anomalías climáticas de temperatura y precipitación se construyen a partir de los campos de temperatura a 2 metros y precipitación total corregida de *NASA POWER*. La posición neta de los especuladores se deriva del reporte *Commitment of Traders* (COT) de la CFTC, mientras que los inventarios certificados (stocks ICE) se extraen de los reportes oficiales de la Intercontinental Exchange. Finalmente, la producción anual de café se obtiene de la tabela 1613 de la Pesquisa Agrícola Municipal (PAM) del IBGE, armonizada con CONAB.

Para capturar la complejidad de los determinantes estructurales del precio del café Arábica en el periodo 2024-2025, se define un modelo de Vectores de Corrección de Errores con variables Exógenas (VECMX). El sistema se descompone en un vector de variables endógenas (y_t) que interactúan en equilibrio dinámico, y un bloque de variables exógenas (x_t) que representan choques bio-físicos independientes del mercado financiero.

El vector de variables endógenas (y_t) de dimensión 9×1 se organiza en tres bloques fundamentales:

- **Bloque de Fundamentos de Mercado:** Incluye el precio del café Arábica ($\log_cafe$), su principal sustituto el Robusta ($\log_rob$) y el nivel de inventarios certificados en la bolsa ICE ($\log_stocks$).
- **Bloque Financiero y de Sentimiento:** Compuesto por el tipo de cambio USD/BRL ($\log_brl$), la posición neta de los especuladores no comerciales ($Net_Position$) y dos componentes principales ($PC1$ y $PC2$) que sintetizan la liquidez global y el apetito por riesgo.
- **Bloque de Costos de Energía e Insumos:** Integra el precio del petróleo ($\log_wti$) y el precio stock CF como proxy de fertilizantes ($\log_nfpi$), capturando las presiones de costos por el lado de la oferta.

Finalmente, el modelo incorpora un **Bloque de Anomalías Climáticas** como variables estrictamente exógenas ($Anom_Temp$ y $Anom_Prec$), fundamentado en la unidireccionalidad de los choques meteorológicos sobre la formación de precios.

Cuadro 3.2: Clasificación y Rol de las Variables en el Modelo VECMX

Bloque Teórico	Variable	Símbolo / Sigla	Rol	Fuente
<i>Mercado Físico</i>	Precio Café Arábica NY	P_t (log_cafe)	Endógena	ICE / Yahoo Finance
	Precio Café Robusta	R_t (log_rob)	Endógena	ICE / Investing.com *
	Inventarios Certificados	I_t (log_stocks)	Endógena	ICE Futures
<i>Financiero</i>	Tipo de Cambio USD/BRL	E_t (log_brl)	Endógena	BCB / FRED
	Posición Neta COT	NP_t (Net_Position)	Endógena	CFTC
	Componente Macro 1 (FCI)	$F_{1,t}$ (PC1)	Endógena	Elaboración propia
	Componente Macro 2 (FCI)	$F_{2,t}$ (PC2)	Endógena	Elaboración propia
<i>Costos / Insumos</i>	Petróleo WTI	W_t (log_wti)	Endógena	EIA / FRED
	Proxy Fertilizantes	C_t (log_nfpi)	Endógena	Investing / CF*
<i>Climático</i>	Anomalía Temperatura	$X_{1,t}$ (anom_temp)	Exógena	NASA POWER
	Anomalía Precipitación	$X_{2,t}$ (anom_prec)	Exógena	NASA POWER

Nota: El bloque climático se define como exógeno debido a la ausencia de retroalimentación desde los precios hacia las variables biofísicas.

* Datos recopilados mediante extracción manual para garantizar la continuidad de la serie en el periodo 2008-2025.

La decisión de tratar el petróleo y los fertilizantes como variables endógenas responde a la hipótesis de financiarización de (Tang y Xiong, 2012), donde los activos de materias primas comparten dinámicas de equilibrio comunes en el largo plazo. Esta especificación permite que el modelo capture el ‘pass-through’ de costos de manera más eficiente que una variable de control estática.

Justificación de la Endogeneidad de los Factores Financieros

Se justifica la inclusión de los componentes principales financieros (PC1 y PC2) como variables endógenas dentro del núcleo del VECM, a pesar de la diferencia de escala entre el mercado del café y los índices globales. Esta decisión se fundamenta en la *hipótesis de financiarización*, según la cual los *commodities* agrícolas han pasado a formar parte de carteras de inversión diversificadas, comportándose parcialmente como activos financieros.

Tratarlos como endógenos permite que estos factores participen en la identificación de los vectores de cointegración (β), capturando posibles relaciones de equilibrio de largo plazo entre el apetito de riesgo global y la cotización del café. Por el contrario, las variables climáticas se mantienen como exógenas estrictas (esquema *VECX*), dado que su naturaleza biológica es independiente de las dinámicas de arbitraje del mercado, actuando únicamente como *shocks* de oferta externos al sistema.

3.2.2. Variables Cualitativas y Choques Estructurales

Se integran 10 variables dicotómicas (*dummies*) para aislar eventos que distorsionan el equilibrio del sistema. Estas se dividen entre *shocks* biofísicos de oferta y eventos logísticos, financieros o geopolíticos, permitiendo que el modelo VECM recoja quiebres estructurales y cambios de régimen (ver Tabla 3.3).

Cuadro 3.3: Cronología y definición de variables determinísticas (D_t)

Categoría	Variable	Tipo	Período	Evento identificado
<i>Choques de oferta y fundamentos biofísicos</i>				
Fisiología	d_bianual	Régimen	Anual	Alternancia biológica (1 = <i>on</i> / 0 = <i>off</i>).
Clima	d_sequia_14	Impulso	2014	Estrés hídrico severo en el Sudeste de Brasil.
Estructural	d_robusta_16	Nivel	2016	Crisis del café Conilon (Espírito Santo).
Clima	d_helada_21	Impulso	Jul-2021	Helada negra en Minas Gerais y São Paulo.
Clima	d_calor_23_24	Impulso	2024	Ola de calor extremo y aborto floral masivo.
<i>Choques macroeconómicos, logísticos y geopolíticos</i>				
Finanzas	d_crisis_08	Nivel	2008	Crisis financiera global y restricción de liquidez.
Pandemia	d_covid_20	Nivel	2020	Disrupción de demanda y consumo por COVID-19.
Logística	d_logistica_21	Nivel	2021	Crisis de contenedores y cuellos de botella.
Geopolítica	d_paz_mar_rojo_24	Nivel	2024	Conflicto en el Mar Rojo y desvío de rutas.
Institucional	d_incertidumbre_25	Régimen	2025	Episodios de incertidumbre política y regulación EUDR.

3.3. Especificación Estructural del Modelo VECMX

Para capturar la interacción dinámica entre los fundamentos biofísicos y el entorno financiero global, se implementa un modelo de **Vector de Corrección de Errores con variables Exógenas (VECMX)**. Este marco permite descomponer la trayectoria de los precios en un equilibrio estructural de largo plazo y ajustes tácticos de corto plazo ante perturbaciones estocásticas.

La representación matemática del sistema se formaliza mediante la siguiente ecuación estructural:

$$\Delta \mathbf{y}_t = \alpha(\beta' \mathbf{y}_{t-1} + \boldsymbol{\rho} + \delta t) + \sum_{i=1}^{p-1} \Gamma_i \Delta \mathbf{y}_{t-i} + \Phi \mathbf{x}_t + \mathbf{D} \mathbf{d}_t + \boldsymbol{\epsilon}_t \quad (3.1)$$

Donde $\mathbf{y}_t$ es el vector de 9 variables endógenas:

$$\mathbf{y}_t = [PC1, PC2, Net_Position, log_wti, log_nfpi, log_brl, log_rob, log_stocks, log_cafe]^\top.$$

Los componentes del modelo se definen funcionalmente de la siguiente manera:

$\Delta \mathbf{y}_t$: Vector de variaciones semanales de las variables endógenas. Representa el **componente de flujo**, capturando el proceso de *Price Discovery* y las reacciones inmediatas ante la llegada de nueva información al mercado.

$\alpha(\beta' \mathbf{y}_{t-1} + \boldsymbol{\rho} + \delta t)$: Representa el **Mecanismo de Corrección de Error (MCE)** y operacionaliza el **Reloj Estructural**.

- **β (Matriz de Cointegración)**: Define el espacio de equilibrio o *atractor dominante*. Los vectores en β capturan las relaciones biológicas y financieras estables, integrando una constante ($\boldsymbol{\rho}$) y una tendencia (δt) que recogen el crecimiento vegetativo o derivas inflacionarias de largo plazo.
- **α (Velocidad de Ajuste)**: Cuantifica la rapidez con la que el sistema corrige las desviaciones respecto al equilibrio. En el contexto de la biologización, un α reducido es evidencia de **histéresis estructural**, donde el mercado tarda más en digerir los choques climáticos antes de retornar a su senda tendencial.

Γ_i : Matrices de coeficientes de corto plazo. Capturan la **inercia sistémica** y la persistencia de la volatilidad vinculada al **Reloj Financiero** (especulación y liquidez) antes de que actúen las fuerzas de equilibrio de largo plazo.

Φ : Matriz de impacto del **Reloj Climático** ($\mathbf{x}_t$). Bajo el esquema de **exogeneidad estricta**, estos coeficientes miden el traspaso directo de las anomalías biofísicas sobre el sistema de precios, asumiendo que el mercado no retroalimenta a las variables meteorológicas.

D : Matriz de intervención para el vector de *dummies* $\mathbf{d}_t$. Permite aislar **shocks de régimen** (como heladas extremas o quiebres logísticos), garantizando que los parámetros climáticos y financieros no se vean contaminados por eventos atípicos.

ϵ_t : Vector de innovaciones estocásticas. Su matriz de varianza-covarianza Ω es el insumo fundamental para la generación de las **Funciones de Impulso-Respuesta Ortogonalizadas (OIRF)**, permitiendo simular cómo un choque en el petróleo o el tipo de cambio se transmite al precio del café.

De acuerdo con el **Teorema de Representación de Granger** (Engle y Granger, 1987), la existencia de al menos un vector de cointegración ($r \geq 1$) implica que el sistema de variables $I(1)$ posee una representación equivalente mediante un **Modelo de Corrección de Errores (VECM)**. En la notación de Johansen, esta relación se formaliza a través de la descomposición de la matriz de impacto $\Pi = \alpha\beta'$, donde β define el espacio de cointegración (el atractor de largo plazo) y α captura las velocidades de ajuste ante desviaciones de dicho equilibrio.

La determinación del rango de cointegración r se realiza mediante los tests de la **traza** y del **máximo autovalor** (Johansen, 1991). Este marco analítico es superior a un modelo VAR estándar en niveles o en diferencias por tres razones críticas:

1. Evita la **pérdida de información estructural** que ocurriría al diferenciar las series para alcanzar estacionariedad.
2. Mitiga el riesgo de **regresiones espurias**, garantizando que los parámetros estimados posean consistencia asintótica.
3. Permite la identificación explícita del **Reloj Estructural** de la zafra 2025, separando las perturbaciones climáticas transitorias de las relaciones fundamentales de precios.

Por consiguiente, una vez validada la presencia de cointegración, la estimación de un VAR exclusivamente en primeras diferencias omitiendo el término de corrección de error constituiría una **malespecificación del sistema**, ignorando la fuerza de atracción que los fundamentos biofísicos ejercen sobre la trayectoria del café Arábica.

3.3.1. Identificación Estructural: La Jerarquía de los Tres Relojes

La estimación de las Funciones de Impulso-Respuesta Ortogonalizadas (OIRF) y la Descomposición de la Varianza (FEVD) requiere resolver el problema de identificación mediante la imposición de restricciones de corto plazo. En esta investigación, se implementa una **identificación recursiva vía descomposición de Cholesky**, la cual operacionaliza la **Teoría de los Tres Relojes**.

Este ordenamiento no es una decisión estadística ad hoc, sino que responde a la **latencia diferencial de respuesta** de cada bloque ante perturbaciones exógenas. La jerarquía de exogeneidad contemporánea se estructura de la siguiente manera:

1. **Bloque del Reloj Financiero** ($PC1, PC2, Net_Position$): Se sitúan en la base de la pirámide de exogeneidad. Representan mercados de alta frecuencia donde los flujos de capital y el sentimiento global reaccionan en milisegundos. Actúan como **emisores de shocks puros** hacia el resto del sistema, asumiendo que no son afectados contemporáneamente por las fluctuaciones específicas del mercado del café dentro de la misma semana.
2. **Bloque del Reloj Estructural y de Costos** ($\log_wti, \log_nfpi, \log_brl$): Variables macro-industriales con una velocidad de ajuste intermedia. El tipo de cambio y los costos de insumos actúan como el **punto de transmisión** entre la liquidez global y la economía real agrícola, capturando la inercia de los contratos de suministro y el *pass-through* cambiario.
3. **Bloque del Reloj Logístico-Físico** ($\log_rob, \log_stocks$): Representan la rigidez de la oferta física. Su reacción es la más lenta del sistema debido a los tiempos de fletamento, los procesos de procesamiento fitosanitario y los estrictos protocolos de certificación de la bolsa ICE.
4. **Variable Objetivo y Receptor Terminal** ($\log_cafe$): El precio de futuros del café Arábica en Nueva York se define como la variable más endógena del sistema. Bajo la hipótesis de eficiencia de mercado, el precio actúa como el **receptor de información terminal**, integrando instantáneamente las perturbaciones de los tres relojes precedentes en su valor de liquidación semanal.

Esta estructura recursiva permite que el modelo VECMX aísle el impacto de una anomalía térmica (exógena) filtrando primero el ruido financiero y luego el ajuste logístico, recuperando así la señal pura de la **Biologización de los Commodities**.

Tratamiento de las Anomalías Climáticas como Exogeneidad Estricta

A diferencia de los modelos VAR tradicionales, las anomalías de temperatura (*Anom_Temp*) y precipitación (*Anom_Prec*) se integran como el vector $\mathbf{x}_t$ de variables exógenas determinísticas. Esta decisión es fundamental para la **identificación causal**: dado que el precio del café no tiene la capacidad de retroalimentar o alterar el clima en Brasil, el tratamiento de estas variables como exógenas estrictas permite que las OIRF capturen el "choque puro" de la naturaleza sobre la formación de precios, sin sesgos de simultaneidad.

Esta distinción es el pilar de la **Nueva Normalidad Biológica**: mientras que el sistema financiero se ajusta recursivamente, el Reloj Climático actúa como una fuerza externa disruptiva que desplaza el equilibrio de largo plazo de manera exógena.

Criterios de Selección de Rezagos y Rango de Cointegración

La implementación empírica del VECMX requiere la determinación del orden de rezagos (p) óptimo. Esta elección es un ejercicio de equilibrio entre la **identificación de la dinámica del sistema** y la preservación de los grados de libertad. Para evitar el sobreajuste y garantizar la eliminación de la correlación serial, se utilizan de forma conjunta los criterios de información de **Akaike (AIC)**, **Schwarz (SC)** y **Hannan–Quinn (HQ)**.

Una vez fijado el orden del sistema, se aplica el **procedimiento de Johansen** (tests de la traza y del máximo autovalor) para determinar el rango de cointegración (r). Este paso es fundamental para validar la existencia de los **Tres Relojes** como una estructura de equilibrio dinámico y no como una mera correlación estocástica.

Protocolos de Diagnóstico y Validación Estructural

Para garantizar la **consistencia asintótica** de las inferencias y la estabilidad de las Funciones de Impulso-Respuesta Ortogonalizadas (OIRF), el modelo estimado se somete a una rigurosa batería de pruebas sobre el vector de innovaciones ϵ_t :

Autocorrelación Serial: Se aplica el **Test LM de Breusch–Godfrey**. El objetivo es confirmar que los residuos se comporten como ruido blanco, asegurando que el modelo ha capturado toda la información sistemática del mercado.

Estabilidad Dinámica: Análisis de las **raíces inversas del polinomio autorregresivo**. Se verifica que las raíces se encuentren dentro del círculo unitario para confirmar que el sistema

es convergente y que los choques climáticos no inducen una divergencia explosiva del precio.

Heterocedasticidad y Normalidad: Se emplean los tests de **White** y **Jarque–Bera**. Siguiendo a (Lütkepohl, 2005), ante la volatilidad extrema intrínseca a la zafra 2025, se prioriza la estabilidad de los parámetros y la ausencia de autocorrelación sobre el supuesto de normalidad estricta, el cual suele relajarse en muestras de gran escala ($N > 900$).

Preservación de la Señal de Largo Plazo: El Rechazo al Filtrado HP

A diferencia de los estudios macroeconómicos que emplean la descomposición tendencia–ciclo, esta investigación descarta explícitamente el uso del **filtro de Hodrick–Prescott (HP)**. Esta decisión se fundamenta en la crítica de (Hamilton, 2018) y responde a dos imperativos del mercado de commodities:

1. **Integridad de la Cointegración:** El filtrado de tendencias (*detrending*) eliminaría la información contenida en los niveles de las series, imposibilitando la identificación del **Reloj Estructural**. La cointegración requiere, por definición, trabajar con las tendencias estocásticas compartidas de las variables.
2. **Prevención de Ciclos Espurios:** Como demuestra Hamilton, el filtro HP puede generar periodicidades artificiales y presenta un severo **sesgo de fin de muestra** (*end-of-sample bias*). Dado que los choques climáticos de 2024–2025 se sitúan precisamente al cierre del horizonte temporal, el uso de HP distorsionaría la cuantificación del impacto real sobre la productividad marginal.

En consecuencia, el modelo se estima utilizando las series en niveles transformadas logarítmicamente, garantizando que el VECMX capture la **histéresis estructural** y el equilibrio fundamental entre la oferta física y el precio.

3.3.2. Identificación Estructural: Funciones de Impulso-Respuesta Ortogonalizadas (OIRF)

Para caracterizar la propagación de perturbaciones inesperadas, se estiman **Funciones de Impulso-Respuesta Ortogonalizadas (OIRF)**. A diferencia de las respuestas simples, las OIRF resuelven el problema de identificación mediante la **descomposición de Cholesky**, la cual impone una estructura recursiva al sistema de variables endógenas.

Esta decisión metodológica permite operacionalizar la **Teoría de los Tres Relojes** al establecer una jerarquía de exogeneidad contemporánea. Al fijar el parámetro `ortho = TRUE` en el motor de estimación (*R package vars*), se garantiza que los *shocks* analizados sean ortogonales entre sí, permitiendo aislar el impacto puro de las anomalías climáticas y financieras sobre el precio del café sin contaminación por correlaciones contemporáneas espurias.

1. **Justificación del Ordenamiento:** El vector $\mathbf{y}_t$ se ordena de mayor a menor exogeneidad (Financiero $\rightarrow$ Estructural $\rightarrow$ Logístico $\rightarrow$ Precio), asumiendo que las variables situadas al inicio del vector impactan contemporáneamente a las siguientes, pero reaccionan ante ellas con un rezago de al menos una semana.
2. **Interpretación de la Sorpresa:** Cada impulso simulado corresponde a una **innovación estructural** de una desviación estándar (σ), representando una noticia inesperada para el mercado que activa el mecanismo de corrección de error hacia el nuevo equilibrio.

3.4. Pruebas de Diagnóstico y Estabilidad

3.4.1. Etapa 1: Protocolos de Estacionariedad y Detección de Quiebres Estructurales

Antes de proceder con la estimación del sistema VECMX, se verifica el orden de integración de las series para mitigar el riesgo de **regresión espuria** y asegurar la consistencia asintótica de los estimadores.

Pruebas de Raíz Unitaria Convencionales: Se aplican los tests **Augmented Dickey–Fuller (ADF)** y **Phillips–Perron (PP)**. Bajo la hipótesis nula de raíz unitaria, estas pruebas permiten identificar si las series exhiben una varianza dependiente del tiempo.

Identificación de Quiebres Endógenos (Zivot–Andrews): Dado que el mercado del café ha enfrentado perturbaciones de régimen (la helada de julio 2021 y el estrés térmico de 2024), se implementa el test de **Zivot–Andrews**. Esta técnica permite identificar puntos de quiebre estructural de forma endógena en intercepto y tendencia, evitando el sesgo de Perron (1989), quien demostró que los tests estándar tienden a no rechazar la hipótesis de raíz unitaria ante la presencia de cambios estructurales puntuales.

Condición de Integración: Para la validez del modelo, se requiere que las variables endógenas operen bajo una estructura $I(1)$ en niveles y resulten estacionarias $I(0)$ tras su primera diferencia.

3.4.2. Etapa 2: Determinación del Rango de Cointegración y Sincronización de Relojes

Se utiliza la metodología de máxima verosimilitud de **Johansen** para determinar el rango de cointegración (r), evaluando si existe un atractor dominante que vincule los fundamentos físicos y financieros con el precio.

Estadísticos de Decisión: El análisis se basa en el test de la **traza** (λ_{trace}) y del **máximo autovalor** (λ_{max}). Mientras que el primero evalúa la hipótesis nula de r vectores frente a la alternativa de k vectores, el segundo ofrece una prueba más restrictiva sobre el número exacto de relaciones de equilibrio.

Validación Teórica: La identificación de, al menos, un vector de cointegración ($r \geq 1$) constituye la validación estadística necesaria para la **Teoría de los Tres Relojes**. En la aplicación empírica (Sección 4.3.4) se determina un rango $r = 4$, que se adopta en la estimación del VECMX. Esto demuestra que, a pesar de los shocks estocásticos de corto plazo, el sistema posee una memoria de largo plazo que impide la divergencia permanente de los precios respecto a sus fundamentos biofísicos y macroeconómicos.

3.4.3. Etapa 3: Protocolos de Validación Post-estimación y Diagnóstico

Una vez estimado el modelo VECMX mediante **Máxima Verosimilitud (ML)**, se somete al sistema a una batería de pruebas de diagnóstico sobre el vector de innovaciones ϵ_t . El objetivo es garantizar que las inferencias no estén sesgadas por problemas de especificación dinámica.

Inferencia de Correlación: Se aplican los tests **LM (Lagrange Multiplier)** y el test de **Portmanteau multivariado**. El éxito de esta etapa radica en no rechazar la hipótesis nula de ausencia de autocorrelación, asegurando que los rezagos seleccionados capturan toda la inercia del sistema.

Evaluación de Volatilidad (ARCH-LM): Se verifica la ausencia de efectos de heterocedasticidad condicional autorregresiva. Esto es crítico para validar que la matriz de varianza-

covarianza sea constante y que los errores estándar de los vectores de cointegración sean fiables.

Tratamiento de la No-Normalidad: Se aplica el test de **Jarque–Bera**. Siguiendo a Lütkepohl (2005), en presencia de $N = 938$ observaciones y alta volatilidad inducida por la zafra 2025, se reconoce que las colas pesadas pueden inducir un rechazo de la normalidad. No obstante, se prioriza la **consistencia asintótica** del modelo basada en la ausencia de autocorrelación y la estabilidad dinámica.

Estabilidad de los Parámetros: Se implementan las pruebas **CUSUM** y **CUSUMQ** sobre los residuos recursivos. Esta validación garantiza que los coeficientes del modelo sean estables ante quiebres estructurales, como el inicio de la crisis logística de 2021 o la anomalía térmica de 2024.

3.4.4. Etapa 4: Validación de Exogeneidad Débil y Causalidad de Largo Plazo

Esta etapa es crítica para la identificación del mecanismo de transmisión. Se analiza la significancia estadística de los coeficientes de la matriz de carga (α), contrastando formalmente la **exogeneidad débil** de las variables financieras y cambiarias.

En particular, se somete a prueba la hipótesis nula $H_0 : \alpha_{\text{BRL}} = 0$ mediante un **test de restricción de sobreidentificación (Ratio de Verosimilitud)**.

- Si H_0 no se rechaza, se corrobora que el **Real Brasileño (BRL)** actúa como una variable "impulsora" que no reacciona ante las desviaciones del equilibrio del mercado del café.
- Esta validación respalda la dirección teórica del **Exchange Rate Pass-Through (ERPT)**, confirmando que el tipo de cambio influye en la formación de precios del Arábica sin ser ajustado por las perturbaciones de la bolsa de Nueva York.

Esta distinción permite blindar la interpretación de las IRF, asegurando que el modelo captura el flujo de información desde la macroeconomía hacia el sector biofísico, y no una retroalimentación espuria.

3.4.5. Etapa 5: Análisis Dinámico e Identificación Estructural de Shocks

Para cuantificar la magnitud, dirección y persistencia de las perturbaciones sobre el sistema, se implementan dos herramientas analíticas fundamentales derivadas del modelo VECMX:

Funciones de Impulso-Respuesta Ortogonalizadas (OIRF): Se utilizan para caracterizar la **dinámica de propagación** de shocks exógenos. La identificación estructural se basa en la **recursividad de Cholesky**, donde se impone que las perturbaciones financieras se transmitan instantáneamente, mientras que los fundamentos físicos presentan una latencia de respuesta mayor. Esto permite aislar la señal del “Reloj Climático” y observar su efecto asintótico sobre el precio del café.

Las funciones de impulso-respuesta se estiman con horizontes de 104, 156 y 312 semanas, garantizando la observación del equilibrio de largo plazo y de la memoria biológica multianual postulada por la Teoría de los Tres Relojes

Descomposición de la Varianza del Error de Pronóstico (FEVD): Esta técnica permite determinar la importancia relativa de cada “Reloj” en la varianza del Arábica. La FEVD es la prueba ácida de la **Hipótesis de Biologización**: el modelo debe demostrar que, en horizontes de largo plazo ($h > 52$ semanas), la contribución del bloque climático y de stocks supera a la varianza explicada por los componentes financieros ($PC1, PC2$).

Validación de Robustez (Estabilidad Asintótica): Como salvaguarda ante la volatilidad extrema del periodo 2024–2025, se valida la fiabilidad de las **Funciones de Impulso-Respuesta Ortogonalizadas (OIRF)** mediante su convergencia en un horizonte extendido hasta 312 semanas. Dado que la muestra presenta una curtosis de 178,38 en los retornos de Arábica, la robustez de la inferencia se garantiza mediante el uso de **bandas de confianza analíticas (errores estándar asintóticos)**, asegurando que la persistencia detectada en la jerarquía de los Tres Relojes sea estructuralmente estable y no un subproducto del ruido estocástico de la muestra.

Este análisis estructural trasciende la mera correlación, permitiendo identificar si el mercado del café ha desarrollado una “memoria climática” persistente o si los shocks térmicos son absorbidos rápidamente por el arbitraje financiero.

3.4.6. Infraestructura Computacional y Flujo de Trabajo Operacional

La implementación del estudio se sustenta en un ecosistema digital diseñado para garantizar la **replicabilidad** y la **escrupulosidad técnica** en el tratamiento de datos masivos:

Ingeniería de Datos y ETL: La fase de extracción, armonización y control de calidad de las

series provenientes de CONAB, IBGE e ICE se ejecutó mediante **Microsoft Excel**. Esta etapa permitió la validación manual de puntos de quiebre y la aplicación de la técnica **LOCF** (*Last Observation Carried Forward*) para los inventarios certificados, asegurando la continuidad de la serie sin introducir sesgos de anticipación. El procesamiento de ponderadores espaciales dinámicos se automatizó en el lenguaje **R**.

Entornos de Desarrollo (IDE): Se adoptó una arquitectura híbrida:

- **Positron:** Como entorno de alto rendimiento para el desarrollo local, optimizando la inspección de las matrices de varianza-covarianza.
- **Google Colab:** Para garantizar la trazabilidad del código y la replicabilidad de las simulaciones en un entorno de computación en la nube basado en *notebooks*.

Ecosistema Analítico (R v4.X): El núcleo econométrico se estructuró sobre paquetes de estándar científico:

- **urca** y **tseries:** Para la ejecución de protocolos de raíz unitaria con quiebre estructural y el procedimiento de Johansen.
- **vars** y **tsDyn:** Motores para la estimación del sistema VECMX, permitiendo la ortogonalización de las IRF y la FEVD.
- **stargazer** y **ggplot2:** Para la generación de reportes con calidad editorial y visualización avanzada de la dinámica de los "Tres Relojes".

3.4.7. Aportes Metodológicos y Contribución al Estado del Arte

Esta investigación trasciende la estimación lineal convencional al introducir tres innovaciones críticas que resuelven las brechas detectadas en la literatura (ej. Nava, 2018):

1. **Optimización del Espacio de Parámetros:** El uso de **Análisis de Componentes Principales (PCA)** permite una reducción de la dimensionalidad que preserva la información del entorno financiero global (S&P 500, DXY, T10) sin incurrir en la inflación de errores estándar por multicolinealidad. Esto garantiza la parsimonia del VECMX.
2. **Granularidad Biofísica Regionalizada:** A diferencia de los modelos con promedios nacionales, esta tesis implementa una **ponderación espacial dinámica** basada en la densidad productiva de las mesorregiones de Minas Gerais. Este enfoque permite que la señal de las

anomalías térmicas sea representativa de la capacidad de impacto real sobre el precio de Nueva York.

3. **Identificación Estructural de la Biologización:** Mediante el uso de **Funciones de Impulso-Respuesta (IRF)** ortogonalizadas bajo la jerarquía de los "Tres Relojes", se logra cuantificar por primera vez la persistencia diferencial de los choques climáticos frente a los financieros en el ciclo 2024–2025.

Esta arquitectura metodológica proporciona una base blindada para la interpretación de los hallazgos empíricos que se detallan en el siguiente capítulo.

Capítulo 4

Aplicación Metodológica: Análisis y Discusión de Resultados

4.1. Reducción de Dimensionalidad: PCA del Entorno Financiero Global

Para capturar la dinámica de los mercados financieros internacionales y mitigar la multicolinealidad entre los indicadores bursátiles, de divisas y de deuda, se aplicó un Análisis de Componentes Principales (PCA) restringido a tres variables críticas: $\log_sp500$, $\log_dxy$ y $\log_t10$.

4.1.1. Reducción de Dimensionalidad: Análisis de Componentes Principales (PCA)

Con el fin de abordar la multicolinealidad entre los indicadores financieros globales y simplificar la estructura del modelo, se estimó un PCA sobre el bloque compuesto por el S&P 500, el índice del dólar (DXY) y el rendimiento de los bonos del Tesoro a 10 años (T10). Los resultados muestran una elevada capacidad de síntesis de información.

Varianza explicada y selección de factores

De acuerdo con el gráfico de sedimentación y las medidas de importancia de los componentes, los dos primeros factores (PC1 y PC2) explican en conjunto el **93.82 %** de la varianza total del bloque financiero.

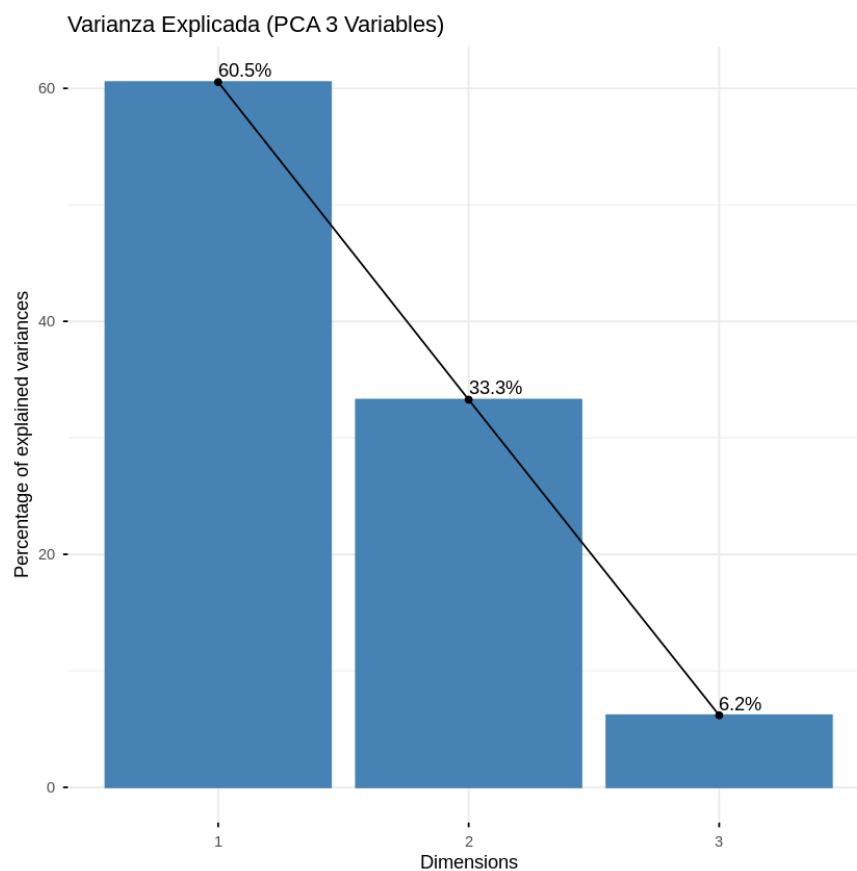


Figura 4.1: Gráfico de sedimentación: porcentaje de varianza explicada por cada dimensión.

Como se observa en la Figura 4.1, el primer componente (PC1) captura el **60.5 %** de la variabilidad, mientras que el segundo (PC2) aporta un **33.3 %** adicional. La pérdida de información asociada a descartar el tercer componente es marginal (en torno al 6.2 %), lo que respalda la decisión de trabajar únicamente con los dos primeros factores principales, que concentran aproximadamente el **93.8 %** de la variabilidad del bloque financiero.

Análisis de cargas (*loadings*) e interpretación económica

La identificación económica de los factores se realiza a partir de las cargas de las variables en cada componente, lo que permite asignarles un significado teóricamente consistente con la literatura.

Cuadro 4.1: Cargas de las variables financieras en los componentes principales

Variable	PC1 (Riesgo)	PC2 (Tasas)	PC3
Log S&P 500	0.706	-0.018	0.707
Log DXY (dólar)	0.705	-0.057	-0.706
Log T10 (bonos)	0.053	0.998	-0.027

- **Factor de riesgo y liquidez global (PC1):** Este componente está dominado por el `log_sp500` (0.706) y el `log_dxy` (0.705), mientras que la contribución de las tasas de interés de largo plazo es prácticamente nula. Representa la dinámica conjunta de los mercados de renta variable y divisas, capturando el apetito por riesgo y el flujo de liquidez sistémica a nivel mundial.
- **Factor de tasas y costo de capital (PC2):** Este factor está determinado casi exclusivamente por los bonos a 10 años, con una carga de 0.998. Su relativa independencia del resto de variables permite interpretarlo como un indicador sintético del costo de oportunidad del capital y de las expectativas de tasas de interés, relevantes para el costo de acarreo de los inventarios.

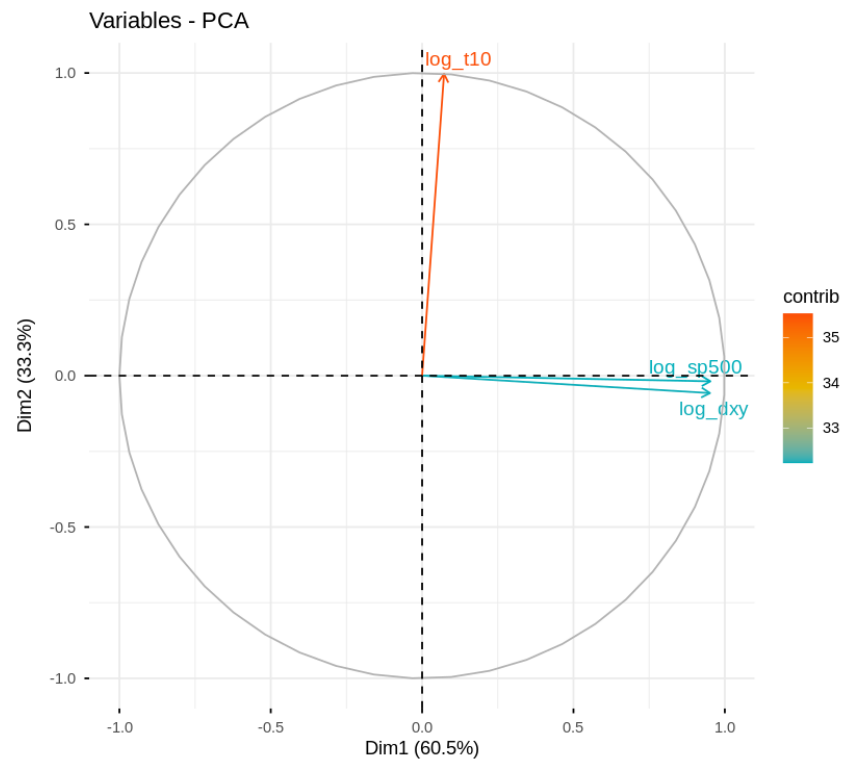


Figura 4.2: Mapa de variables: contribución y proyección en el espacio de PC1 y PC2.

El mapa de variables (Figura 4.2) ilustra gráficamente la ortogonalidad entre ambos factores: mientras el S&P 500 y el DXY se proyectan principalmente sobre el eje horizontal (Dim1 = PC1), la variable T10 se proyecta casi en su totalidad sobre el eje vertical (Dim2 = PC2). Esta separación garantiza que el modelo VECMX pueda distinguir entre choques de liquidez y apetito por riesgo, por un lado, y choques de política monetaria de largo plazo, por otro.

4.2. Análisis Descriptivo de las Variables

El análisis descriptivo permite caracterizar el comportamiento de las catorce variables que componen el sistema. Esta arquitectura multidimensional busca capturar la complejidad de la formación de precios del café Arábica, integrando factores de mercado, choques biofísicos y el entorno macrofinanciero global.

Cuadro 4.2: Estadística descriptiva del ecosistema de datos (2008–2025)

Statistic	N	Mean	St. Dev.	Min	Max
Log Precio Arábica	938	5.063	0.344	4.470	6.040
Log Precio Robusta	938	1.620	0.066	1.497	1.798
Posición Neta (COT)	938	7,287.849	34,910.940	−111,997	72,818
Log Stocks ICE	938	14.310	0.611	12.320	15.343
Log BRL/USD	938	1.161	0.440	0.438	1.825
Anom. Temperatura	938	0.043	0.987	−2.908	3.622
Anom. Precipitación	938	−0.006	0.978	−1.884	4.062
Log Petróleo (WTI)	938	4.235	0.330	2.740	4.976
Log Fertilizantes (NFPI)	938	3.714	0.537	2.184	4.774
Log S&P 500	938	7.762	0.558	6.527	8.844
Log DXY (Dólar)	938	4.507	0.112	4.272	4.730
Log T10 (Bonos)	938	0.914	0.430	−0.598	1.595
Factor Riesgo (PC1)	938	0.000	1.348	−2.240	2.448
Factor Tasas (PC2)	938	−0.000	0.999	−3.536	1.482

4.2.1. Estadística Descriptiva del Sistema

Interpretación de la estadística descriptiva

A partir de los resultados presentados en la Tabla 4.2, se desprenden varios elementos relevantes para la validación y contextualización del modelo:

1. **Volatilidad comparada:** El precio del café Arábica (`log_cafe`) presenta una desviación estándar (0.344) significativamente mayor que la del café Robusta (`log_rob`). Esto indica que el contrato “C” de la ICE es más sensible a perturbaciones del entorno que el Robusta, lo que justifica su tratamiento como eje de la volatilidad en el sistema y su análisis detallado como variable objetivo.
2. **Amplitud de la posición especulativa:** La variable `Net_Position` (reporte COT) exhibe la mayor dispersión relativa del sistema. El rango entre −111.997 y 72.818 contratos refleja cambios marcados en el posicionamiento neto de los *Money Managers*, desde episodios fuertemente bajistas hasta fases de acumulación significativa de posiciones largas. Este comportamiento sugiere que la especulación financiera puede amplificar los movimientos de precios generados por los fundamentos.
3. **Presencia de eventos climáticos extremos:** Las anomalías térmicas (`anom_temp`) alcanzan valores máximos en torno a 3.62°C. Dado que se trata de datos semanales, desviaciones de

esta magnitud sostenidas en el tiempo son indicativas de episodios de olas de calor relevantes en las zonas productoras de Minas Gerais. Este patrón respalda la existencia de choques de oferta biofísicos sustantivos que el modelo VECMX busca capturar.

4. **Componentes principales (PC1 y PC2):** El factor de riesgo (PC1) presenta una varianza superior a la unidad (1.348), lo que indica que concentra una proporción importante de la variabilidad conjunta de las variables financieras originales ($\log_sp500$, $\log_dxy$, $\log_t10$). Por su parte, el PC2 mantiene una varianza cercana a la unidad y se interpreta como un factor complementario asociado al costo de capital, permitiendo una representación parsimoniosa y económicamente interpretable del entorno macro-financiero global.

Matriz de Correlación: Fundamentos, Clima y Finanzas

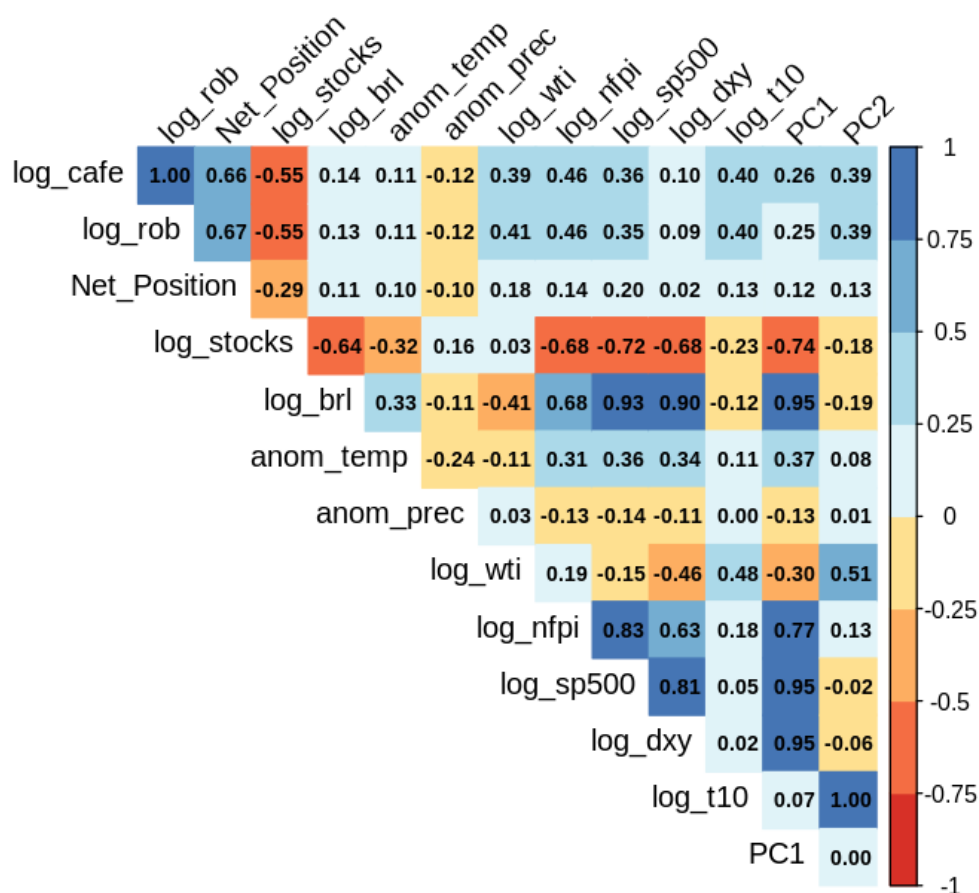


Figura 4.3: Matriz de correlación: interdependencias entre fundamentos, clima y finanzas

Nota: Los valores representan coeficientes de correlación de Pearson. El bloque azul indica relaciones positivas y el bloque rojo relaciones negativas. Datos semanales 2008–2025 ($n = 938$).

Análisis de correlaciones bivariadas

Tras el análisis de las estadísticas individuales, se estudian las interdependencias lineales mediante una matriz de correlación (Figura 4.3). Esta etapa permite identificar canales de transmisión

preliminares entre los fundamentos físicos, el posicionamiento financiero y los factores macroeconómicos.

De acuerdo con los coeficientes de correlación de Pearson calculados, se destacan los siguientes patrones:

- **Relación precio–inventarios y teoría del almacenamiento:** El precio del café Arábica (`log_cafe`) muestra una correlación negativa moderada con los inventarios certificados (`log_stocks`) de aproximadamente -0.55 . Este resultado es consistente con la teoría del almacenamiento, en la medida en que niveles más bajos de existencias físicas se asocian con contextos de mayor tensión en la oferta y, por ende, con presiones alcistas sobre el precio.
- **Correlación con la posición especulativa:** Se observa una correlación positiva en torno a 0.66 entre `log_cafe` y la posición neta de los especuladores (`Net_Position`). Esta asociación sugiere que los episodios de precios elevados suelen coincidir con fases de posicionamiento neto comprador por parte de los *Money Managers*, lo que es compatible con la idea de que el capital financiero puede reforzar o acelerar tendencias originadas en los fundamentos.
- **Dinámica de sustitución Árábica–Robusta:** La correlación entre el Arábica y el Robusta (`log_rob`) es de aproximadamente 0.67 , lo que indica un alto grado de co-movilidad entre ambas variedades. Este resultado respalda la inclusión del Robusta como variable endógena para capturar el efecto de sustitución y la integración entre mercados.
- **Señal climática y bloque financiero:** Las anomalías térmicas (`anom_temp`) y de precipitación (`anom_prec`) presentan correlaciones relativamente bajas con el precio (0.11 y -0.12 , respectivamente). Aunque estos coeficientes lineales son de magnitud moderada, su interés radica en que las variables climáticas muestran baja correlación con el factor financiero `PC1`, lo que facilita tratarlas como choques de oferta biofísicos diferenciados del ruido macro-financiero.
- **Sincronía del entorno macro-financiero:** Se verifica una correlación muy elevada (superior a 0.90) entre el tipo de cambio (`log_br1`), el S&P 500 (`log_sp500`), el índice DXY (`log_dxy`) y el factor de riesgo (`PC1`). A su vez, el factor de tasas (`PC2`) presenta una correlación prácticamente perfecta (≈ 1.00) con los bonos a 10 años (`log_t10`). Estos resultados confirman la eficacia del Análisis de Componentes Principales (PCA) para sintetizar el riesgo global y el costo de capital en dos factores ortogonales y parsimoniosos.

4.2.2. Análisis de distribución y validación de *outliers*

Para garantizar que los datos se encuentran libres de errores evidentes y para validar la presencia de eventos extremos de naturaleza estructural, se realizó un análisis de distribución mediante histogramas y diagramas de caja para las catorce variables del sistema.

Análisis de distribución: Panel de mercado (endógenas)

El primer panel de análisis se centra en las variables del núcleo dinámico de largo plazo, las cuales definen el descubrimiento de precios y la interacción física en el mercado de café.

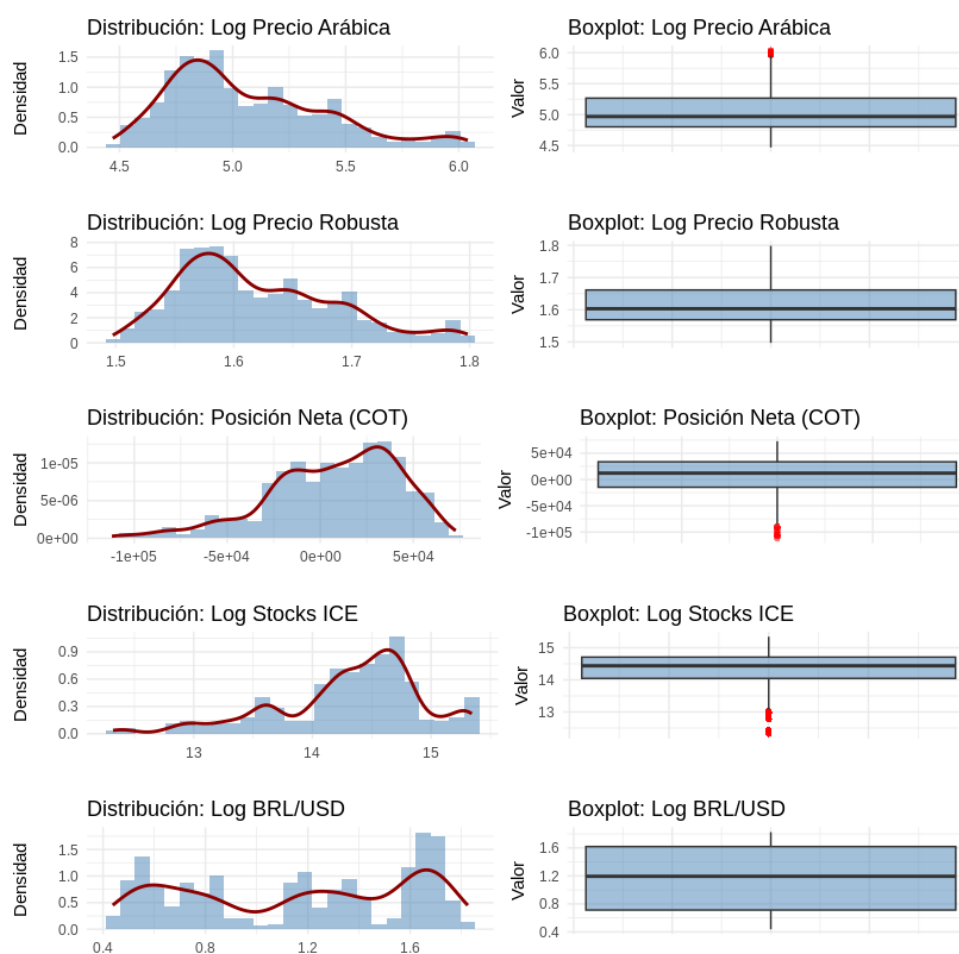


Figura 4.4: Panel de distribución y boxplots: variables endógenas de mercado.

Nota: Elaboración propia a partir de datos de ICE, CFTC y BCB. Los puntos rojos en los boxplots indican valores atípicos identificados mediante el método de rango intercuartílico.

A continuación, se detallan los principales rasgos observados en las distribuciones y en los identificadores de valores atípicos (*outliers*) para las cinco variables endógenas principales:

- **Log Precio Arábica (*log_cafe*):** La distribución presenta una asimetría positiva, con una mayor densidad de observaciones entre 4.7 y 4.9. El boxplot revela la presencia de **valores atípicos en el extremo superior** (por encima de 6.0), que corresponden a los picos históricos de precios asociados a choques de oferta recientes. Este patrón respalda el tratamiento del Arábica como variable central en el proceso de descubrimiento de precios dentro de la taxonomía del modelo.
- **Log Precio Robusta (*log_rob*):** Presenta una distribución levemente bimodal, con un pico predominante cerca de 1.6. A diferencia del Arábica, no se observan *outliers* particularmente extremos en los bordes de la distribución, lo que sugiere un comportamiento relativamente más contenido. Sin embargo, su correlación con el Arábica en torno a 0.67 confirma la relevancia del efecto sustitución y de arbitraje planteado en el marco teórico.
- **Posición Neta COT (*Net_Position*):** Esta variable muestra una distribución con una cola izquierda extendida, indicativa de periodos en que la especulación se tornó marcadamente bajista. Los ***outliers negativos*** identificados en el boxplot (posiciones *short* extremas por debajo de -100.000 contratos) son coherentes con episodios de fuerte participación especulativa, en los que el posicionamiento de los *Money Managers* puede haber amplificado movimientos de precio.
- **Log Stocks ICE (*log_stocks*):** La distribución es asimétrica hacia la izquierda, con una concentración de datos en niveles elevados (en torno a 14.5). No obstante, el boxplot pone de manifiesto ***outliers críticos en el extremo inferior*** (niveles por debajo de 13.0), que se corresponden con periodos de escasez marcada de inventarios certificados. Estos mínimos históricos, combinados con su correlación negativa con el precio, respaldan empíricamente la aplicación de la Teoría del Almacenamiento.
- **Log BRL/USD (*log_br1*):** La distribución es marcadamente multimodal, con tres picos definidos que reflejan distintos regímenes cambiarios en Brasil durante 2008–2025. La ausencia de *outliers* extremos sugiere que, pese a la depreciación del real brasileño, el movimiento ha sido predominantemente tendencial, en línea con el contexto de un *pass-through* cambiario gradual sobre el sector exportador.

Síntesis del panel de mercado: La inspección visual del Panel de Mercado confirma que las series presentan distribuciones no normales y la presencia de valores extremos que no deben ser tratados como errores de medición, sino como manifestaciones de choques económicos y climáticos relevantes para el período de estudio. La coexistencia de *outliers* en el precio (máximos) y en los inventarios (mínimos) es consistente con la narrativa de episodios de tensión física y volatilidad elevada en el mercado.

Análisis de distribución: Panel de choques exógenos

Este bloque agrupa las variables que operan como factores externos al sistema financiero, representando los riesgos biofísicos y los determinantes de costos de producción globales.

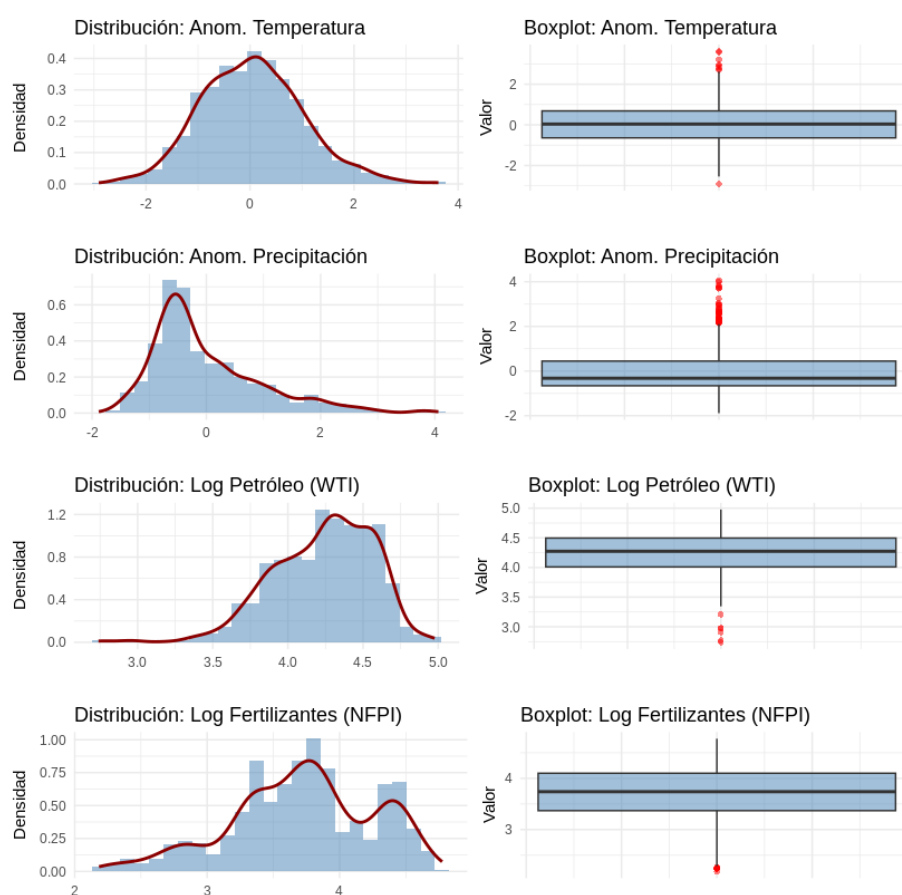


Figura 4.5: Panel de distribución y boxplots: choques exógenos (clima e insumos).

Nota: Elaboración propia a partir de datos de NASA POWER, EIA y el índice de precios de insumos. Los *outliers* climáticos son representativos de choques de oferta reales ocurridos durante el periodo 2008–2025.

El análisis de sus distribuciones respalda el tratamiento de estas variables como exógenas en el modelo VECMX:

- **Anomalía de temperatura (*anom_temp*):** La distribución presenta colas pesadas con *outliers* bidireccionales. Los valores superiores (por encima de 2.0°C) recogen episodios de olas de calor, mientras que el valor extremo inferior se asocia a la helada de 2021. Estos eventos refuerzan la interpretación de la serie como indicador de estrés térmico para el cafeto.
- **Anomalía de precipitación (*anom_prec*):** Exhibe una asimetría positiva marcada, con múltiples *outliers* superiores que representan eventos de pluviosidad extrema. La presencia de valores negativos persistentes en la serie cronológica es consistente con periodos de déficit hídrico en las zonas productoras, que afectan la productividad.
- **Log Petróleo WTI (*log_wti*):** Muestra una distribución bimodal, con valores atípicos inferiores asociados a la crisis energética de 2020. Su papel como *proxy* de los costos de logística y transporte se ve respaldado por su correlación positiva con el precio del café.
- **Log Fertilizantes (*log_nfpi*):** La distribución multimodal refleja la variabilidad de los precios de los insumos agrícolas a nivel global. Su correlación positiva con el Arábica indica que el mercado del café está expuesto a la dinámica sistémica de los costos de nutrición vegetal y fertilización.

Análisis de distribución: Panel financiero y factores sintéticos

El tercer panel sintetiza el entorno macro-financiero global, integrando indicadores de liquidez, tipos de interés y los factores derivados del PCA.

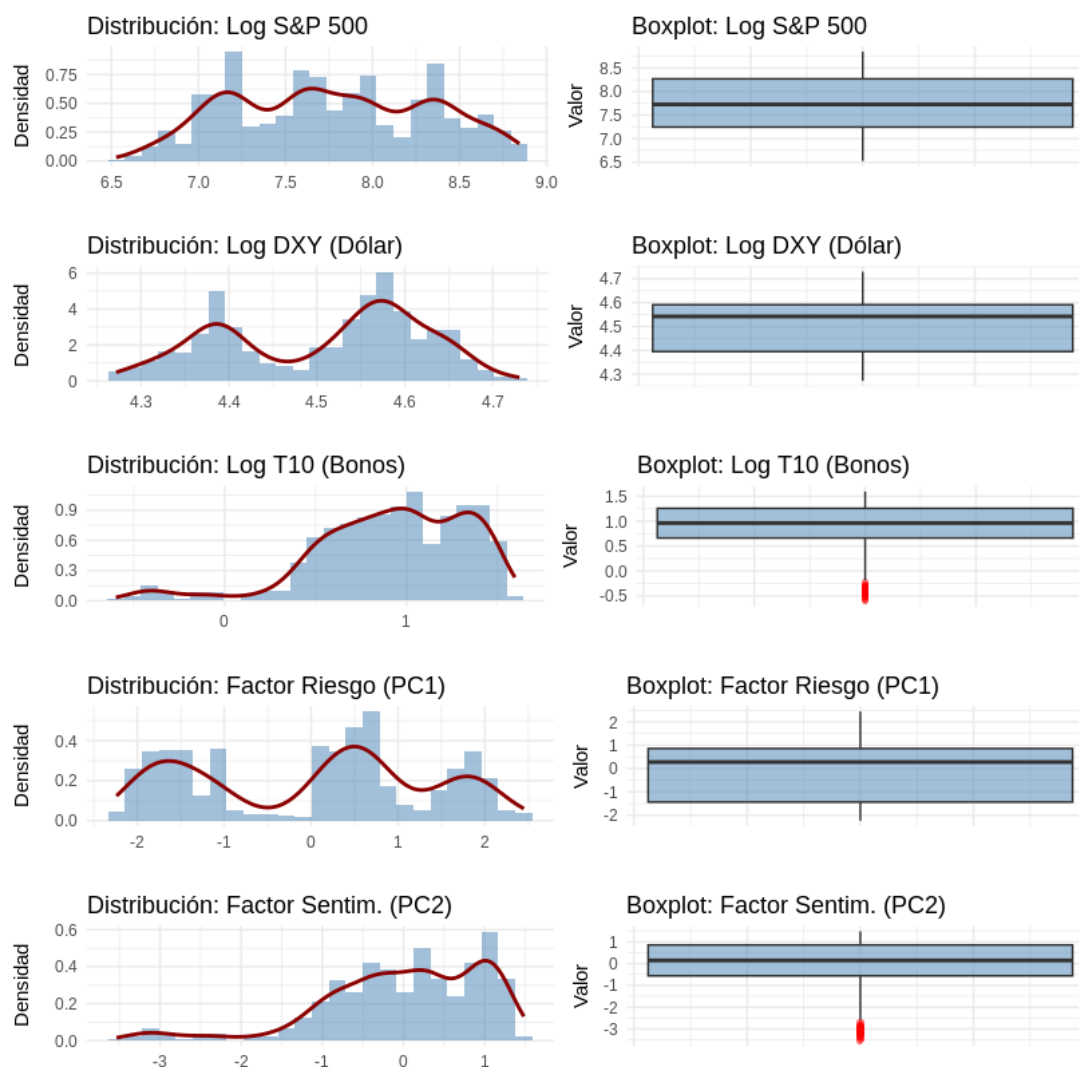


Figura 4.6: Panel de distribución y boxplots: bloque financiero y factores sintéticos.

Nota: Elaboración propia. Los factores PC1 y PC2 representan la reducción de dimensionalidad de las variables macroeconómicas mediante PCA, manteniendo la trazabilidad del riesgo y del costo de capital.

Este bloque permite capturar la dimensión de la financiarización y su interacción con el proceso de formación de precios:

- **Log S&P 500 ($\log_{sp500}$) y DXY ($\log_{dxy}$):** Ambos indicadores muestran distribuciones multimodales que reflejan distintos regímenes macroeconómicos. La ausencia de *outliers* extremos es consistente con su papel como variables de tendencia de largo plazo en el sistema.
- **Log T10 ($\log_{t10}$):** Presenta una distribución sesgada con *outliers* en el extremo inferior,

asociados a periodos de intervención monetaria intensa y tasas mínimas históricas. Este comportamiento recoge la fase de política monetaria extraordinariamente expansiva observada en la última década.

- **Factor de riesgo (PC1):** Como síntesis de las condiciones de liquidez y del apetito por riesgo, su distribución multimodal es coherente con los cambios de régimen en los mercados financieros globales. Su alta correlación con el tipo de cambio real/dólar lo posiciona como un factor relevante para capturar el canal financiero dentro del modelo.
- **Factor de tasas (PC2):** Muestra una distribución con colas pesadas y *outliers* negativos significativos, que representan episodios de tasas de interés excepcionalmente bajas. Estos valores inciden en el costo de acarreo (*carry cost*) y, por extensión, en la dinámica de inventarios y en la rentabilidad de las posiciones sobre commodities.

4.2.3. Análisis de dispersión: determinantes críticos del precio

Para profundizar en las interdependencias detectadas en la fase descriptiva, se analizan los diagramas de dispersión que vinculan la cotización del café Arábica con sus principales *drivers* físicos, climáticos y financieros. Estos gráficos permiten visualizar la naturaleza de las pendientes y la densidad de las observaciones en distintos episodios de estrés de mercado.

Análisis de Dispersión: Determinantes del Precio

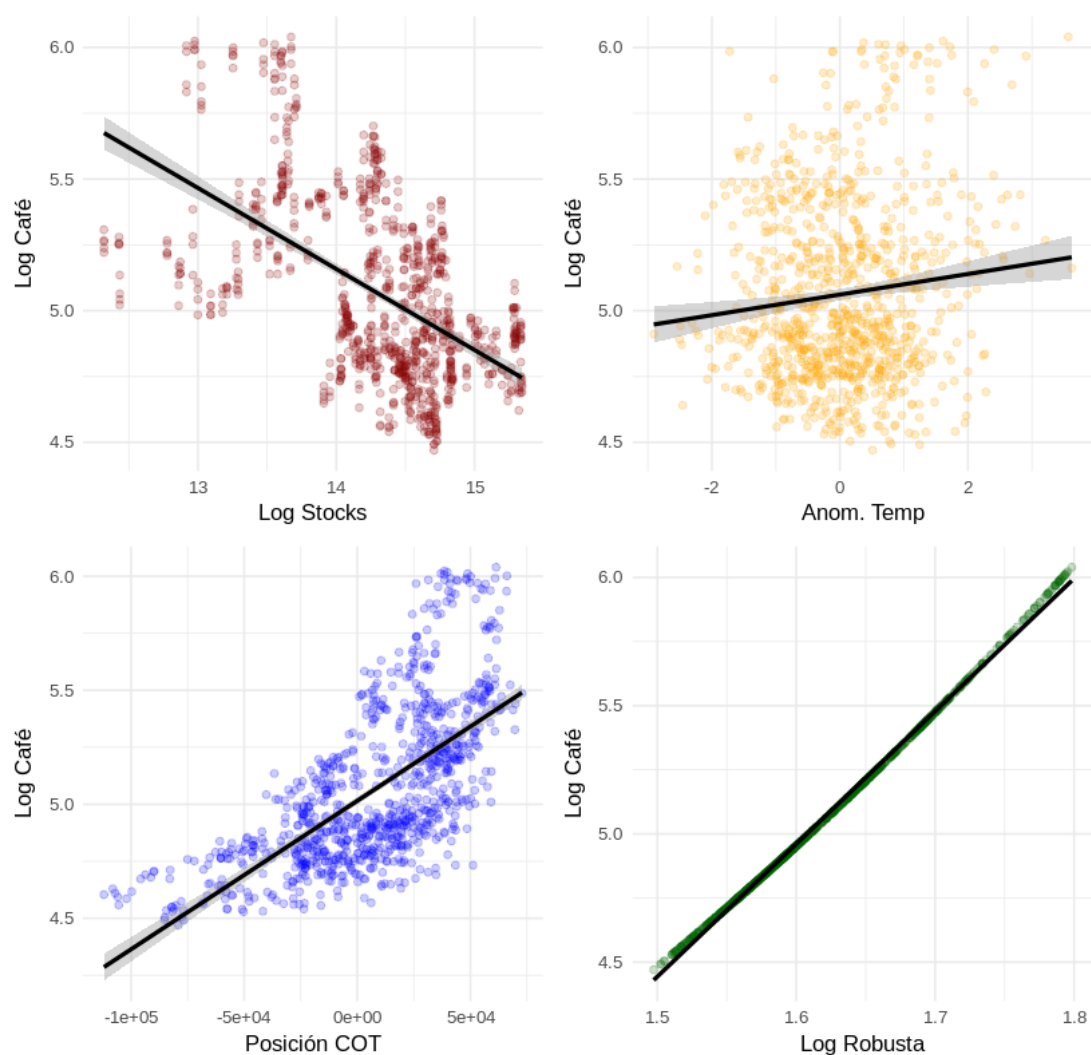


Figura 4.7: Diagramas de dispersión: relación del Log Café con stocks, clima, especulación y Robusta.

Interpretación de las relaciones bivariadas

De la inspección visual de los cuatro paneles se desprenden los siguientes elementos, relevantes para la especificación y estimación estructural:

- **Relación precio–stocks y Teoría del Almacenamiento (Panel rojo):** Se observa una relación inversa marcada entre el Log Café y el Log Stocks. La pendiente negativa indica que los niveles de precios más elevados se concentran en entornos de inventarios certificados reducidos. Este patrón es coherente con la Teoría del Almacenamiento, según la cual la escasez

física reduce la capacidad de absorber *shocks* de oferta y aumenta la sensibilidad del precio.

- **Anomalías térmicas y prima de riesgo climático (Panel naranja):** La dispersión muestra una relación positiva entre las anomalías térmicas y el precio. A medida que la temperatura en las zonas productoras de Brasil se desplaza hacia valores positivos extremos (indicativos de olas de calor y estrés hídrico), la cotización en la ICE US tiende a situarse en niveles más altos. Aunque la nube de puntos es más dispersa que en otros casos, la línea de tendencia sugiere la presencia de una prima de riesgo climático incorporada por los agentes ante el deterioro esperado de la productividad biofísica.
- **Posición especulativa y dinámica de la financiarización (Panel azul):** Se aprecia una relación directa y positiva entre la Posición COT (Net Position de los *Money Managers*) y el precio. Los episodios de tendencias alcistas pronunciadas coinciden visualmente con fases de acumulación de posiciones largas por parte de los especuladores. Este comportamiento es consistente con la idea de que el capital financiero puede amplificar movimientos de precio originados en los fundamentos, más que limitarse a reflejarlos de forma pasiva.
- **Efecto sustitución y arbitraje Árabe–Robusta (Panel verde):** El panel muestra una relación casi lineal entre el Árabe y el Robusta (Log Robusta), con una estrecha concentración de los puntos alrededor de la línea de regresión. Ello sugiere una integración profunda entre ambos mercados y respalda la hipótesis de que episodios de escasez en una de las variedades (en particular, el Robusta en el ciclo reciente) ejercen presión inmediata sobre la otra. Este hallazgo justifica la inclusión del Robusta como variable endógena en el sistema.

Síntesis de la evidencia visual: La coherencia de las pendientes observadas en los diagramas de dispersión es compatible con los canales de transmisión planteados en el marco teórico: dependencia física vía inventarios, integración de mercado a través del Robusta y efectos de choques climáticos y financieros. Esta evidencia gráfica proporciona un sustento adicional para avanzar hacia las pruebas de cointegración y la estimación del modelo VECMX, en el que estos vínculos se formalizan en términos econométricos.

4.2.4. Análisis de correlación dinámica: indicios de cambio en el régimen dominante

Para evaluar la estabilidad temporal de las relaciones entre el precio del café y sus determinantes, se realizó un análisis de correlación móvil (*rolling correlation*) con una ventana de 52 semanas. Este enfoque permite identificar posibles transiciones en la importancia relativa de los factores financieros y climáticos sobre la formación de precios en el periodo 2008–2025.

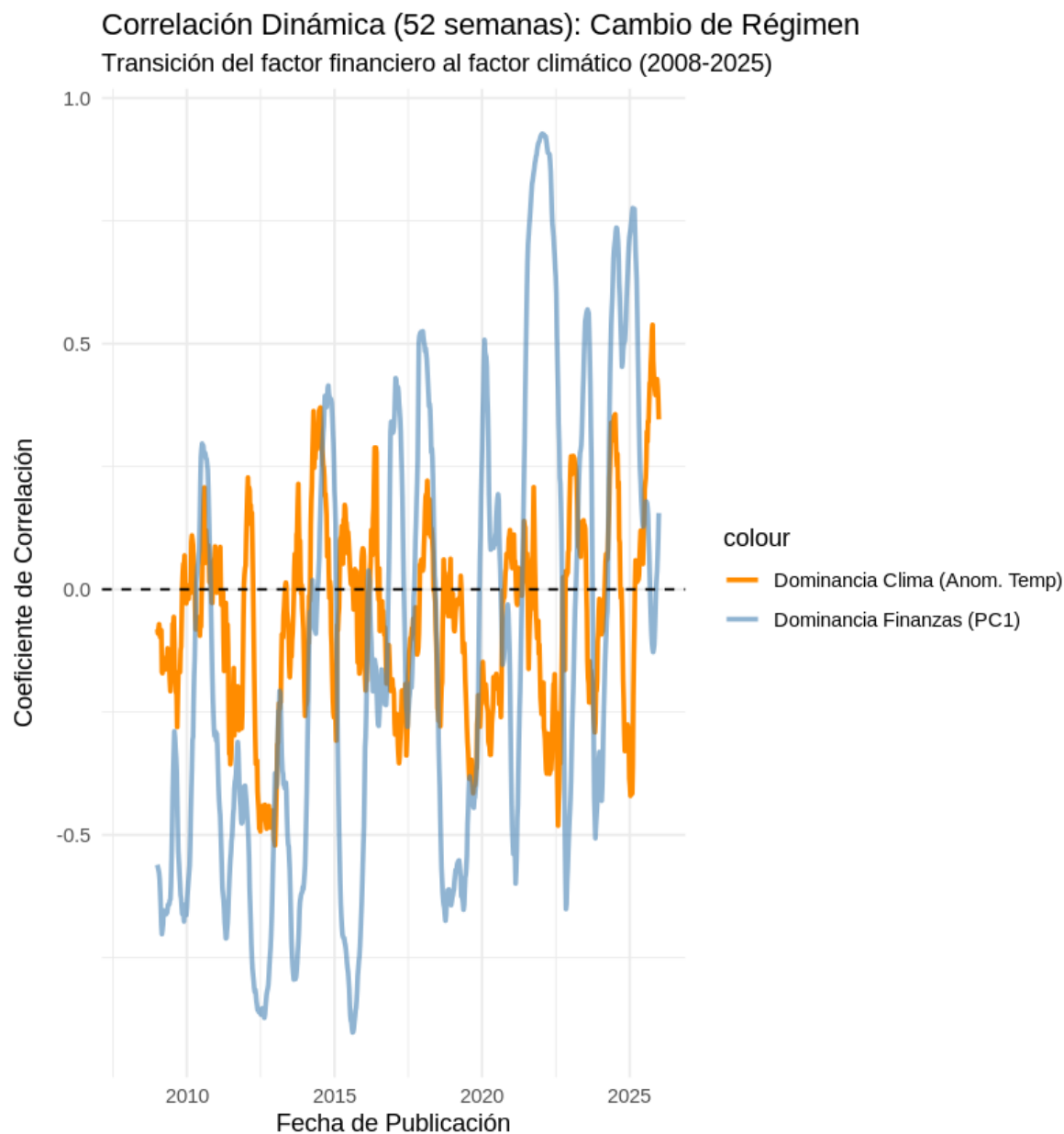


Figura 4.8: Correlación dinámica (52 semanas): evolución del factor financiero y del factor climático.

Interpretación de la evolución temporal

La inspección visual de la dinámica de las correlaciones aporta elementos relevantes sobre la estructura actual del mercado:

- **Evolución del factor financiero (PC1):** La serie representada en azul, correspondiente a la correlación entre el precio y el factor financiero PC1, muestra una volatilidad considerable a lo largo del periodo. Históricamente, este componente ha estado estrechamente asociado a los ciclos de precio, alcanzando picos de correlación cercanos a 0.9 en fases de alta liquidez global (por ejemplo, en torno a 2022). Sin embargo, hacia el cierre del horizonte de estudio (2024–2025) se aprecia una disminución marcada de esta correlación, lo que sugiere una pérdida de protagonismo relativo del bloque financiero en la explicación de los movimientos más recientes del precio.
- **Aumento de la relevancia del factor climático (Anom. Temp):** La serie en naranja, que mide la correlación entre las anomalías térmicas y el precio, se mantenía en gran parte de la década anterior fluctuando en torno a valores cercanos a cero. A partir de 2024, se observa una tendencia alcista y más persistente de esta correlación, lo que indica que los episodios de temperatura extrema comienzan a asociarse de forma más sistemática con niveles elevados de precio. Este comportamiento es coherente con la idea de que el mercado incorpora con mayor intensidad una prima por riesgo climático.
- **Indicios de cambio en el régimen dominante:** El gráfico muestra en el tramo final de la serie un patrón de “tijera” entre ambas correlaciones: mientras la correlación con PC1 descende de forma pronunciada, la correlación con las anomalías térmicas alcanza niveles positivos sostenidos que no se habían observado previamente en el registro histórico. Este contraste sugiere un cambio en el régimen dominante de determinación del precio, desde un entorno más condicionado por factores macro-financieros hacia otro en el que los choques climáticos y sus efectos sobre la oferta adquieren un peso relativo mayor.

Síntesis analítica: La combinación de una correlación decreciente entre el precio y el factor financiero PC1 y una correlación creciente y más estable con las anomalías térmicas hacia el año 2025 respalda la decisión de especificar un modelo VECMX que integre explícitamente el bloque climático como conjunto de variables exógenas. La dinámica observada sugiere que los equilibrios de largo plazo del mercado de café ya no pueden analizarse únicamente a partir de variables de

liquidez o tasas de interés, sino que requieren incorporar los choques climáticos como determinantes relevantes de la trayectoria de la oferta y, por extensión, del precio.

Síntesis del diagnóstico y justificación del modelo

Como cierre del análisis descriptivo, se presentan las conclusiones fundamentales que motivan y respaldan la arquitectura del modelo econométrico final:

- **Presencia de choques estructurales:** La identificación de *outliers* extremos en las anomalías térmicas y en los niveles de inventarios indica que el mercado del café ha operado, especialmente durante el bienio 2024–2025, bajo condiciones de estrés hídrico y escasez física pronunciada. Estos episodios no se interpretan como ruido estadístico, sino como choques estructurales con impacto persistente sobre la trayectoria de precios.
- **Validación de la taxonomía financiera:** La matriz de correlación muestra que el factor de riesgo PC1 reproduce con alta precisión los movimientos conjuntos del S&P 500 y del DXY, mientras que PC2 captura el comportamiento de las tasas de largo plazo. Esta evidencia respalda el uso de componentes principales como herramienta para sintetizar el entorno financiero global de forma parsimoniosa, reduciendo problemas de multicolinealidad en el sistema VECMX.
- **Evidencia de cambios en el régimen de determinación del precio:** El análisis de correlación móvil no constituye por sí solo una prueba formal de cambio de régimen, pero sí proporciona evidencia consistente con una transición hacia un contexto en el que los factores climáticos y de oferta física ganan relevancia frente a los determinantes financieros tradicionales. Este resultado refuerza la pertinencia de un modelo que trate a las anomalías climáticas como variables exógenas con capacidad de influir de manera significativa en la dinámica del sistema.

Conclusión del análisis descriptivo: En conjunto, el ecosistema de datos presenta las propiedades necesarias para un estudio de cointegración: interdependencias teóricas sólidas, presencia de eventos extremos con interpretación económica clara y una dinámica temporal en la que se observan cambios en el peso relativo de los distintos determinantes del precio. Sobre esta base, se procede a la verificación formal de los supuestos econométricos de raíz unitaria y quiebres estructurales, paso previo a la estimación del modelo VECMX.

4.2.5. Evolución temporal de las series

Una vez descritas las propiedades estadísticas y las interdependencias transversales del sistema, resulta fundamental analizar el comportamiento dinámico de las variables a lo largo del horizonte temporal 2008–2025. El estudio de las series de tiempo permite identificar la persistencia de eventos extremos, la presencia de posibles quiebres estructurales y la evolución de los regímenes de volatilidad que el modelo econométrico deberá contrastar formalmente.

Marco metodológico: estandarización mediante Z-Scores

Dada la heterogeneidad de las métricas empleadas en este estudio —que incluyen logaritmos de precios, niveles de inventarios en sacos, posiciones netas de contratos y anomalías climáticas en grados Celsius—, se ha optado por un marco de análisis basado en la estandarización de los datos. Para facilitar la comparabilidad visual y analítica, todas las series han sido transformadas a puntajes Z (Z-Scores) mediante la siguiente expresión:

$$Z = \frac{x_t - \mu}{\sigma}$$

donde x_t representa el valor observado en el tiempo t , μ es la media aritmética de la serie y σ su desviación estándar. La adopción de este procedimiento técnico ofrece varios beneficios para el diagnóstico descriptivo:

- **Sincronía y comparabilidad:** Permite superponer variables con órdenes de magnitud distintos en un único plano cartesiano, haciendo visibles convergencias y divergencias que de otro modo serían difíciles de apreciar.
- **Detección de anomalías históricas:** Al expresar los movimientos en desviaciones estándar, cualquier observación que supere el rango de $|2|$ se identifica inmediatamente como un evento de estrés o un posible choque estructural, facilitando el seguimiento de su impacto a través del sistema.
- **Identificación de tendencias estocásticas:** Facilita la observación de periodos en los que las variables se alejan de su comportamiento promedio de manera persistente, proporcionando una justificación visual para las posteriores pruebas de raíz unitaria y quiebres estructurales.

Dinámica de la cosecha y el ciclo bianual estructural

Bajo este marco de análisis temporal, el estudio avanza desde los fundamentos físicos de la producción hasta la dinámica sistémica del mercado global. La oferta de café Arábica está regida primordialmente por el ciclo biológico del cafeto en Brasil, el cual impone una restricción de fondo a la disponibilidad de grano. A continuación, se presenta la evolución de la producción física, destacando la alternancia de rendimientos y la proyección para el cierre del horizonte de estudio.

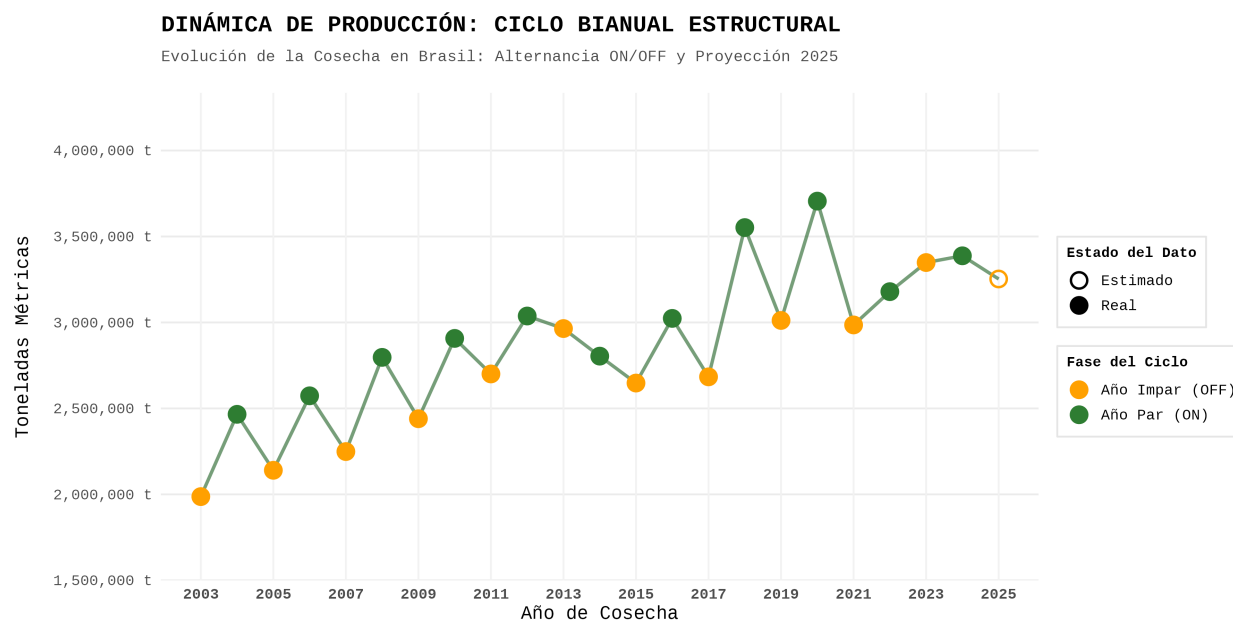


Figura 4.9: Dinámica de producción: ciclo bianual estructural y proyección para 2025.

El análisis visual de la serie cronológica permite identificar varios hitos técnicos que ayudan a caracterizar la rigidez de la oferta actual:

- **Alternancia fisiológica estructural (ON/OFF):** La serie confirma la vigencia de la alternancia de rendimientos en Brasil. Los años pares (en verde) corresponden a fases de alta productividad (“Año ON”), fundamentales para la recomposición de los inventarios globales, mientras que los años impares (en naranja) representan fases de recuperación fisiológica (“Año OFF”).
- **Rango de operación y techos productivos:** El volumen de cosecha se mantiene estructuralmente en un rango aproximado entre 2.000.000 y 3.700.000 toneladas métricas. Se observa que el techo productivo alcanzado en 2020 resulta difícil de superar, en parte debido a la recurrencia de eventos climáticos adversos que han limitado la capacidad de las zafras “ON”

para alcanzar su potencial máximo teórico.

- **Interferencia de choques biofísicos:** La persistencia de anomalías térmicas y episodios de estrés hídrico ha erosionado la regularidad de la bianualidad. Esta interferencia climática dificulta que el sistema de inventarios se reponga de manera eficiente, generando un estado de vulnerabilidad en el que los fundamentos biológicos de la planta interactúan de forma no lineal con el riesgo de mercado.
- **Estado del dato y estimación 2025:** La visualización distingue claramente los registros históricos de la proyección para el ciclo 2025, identificado como un año impar (ciclo “OFF”). El nivel estimado se sitúa por debajo de la zafra precedente, lo que sugiere que la presión sobre la oferta física y la rigidez del mercado podrían mantenerse, apoyando escenarios de precios estructuralmente elevados.

Implicaciones sistémicas: Esta restricción biológica de la oferta, combinada con niveles históricamente bajos de inventarios certificados y una demanda relativamente estable, contribuye a explicar la elevada sensibilidad de las cotizaciones. La dificultad para superar el umbral de 3.7 millones de toneladas, junto con la mayor frecuencia de episodios climáticos adversos, es consistente con un contexto en el que los factores biofísicos adquieren un peso creciente en la formación de precios, reduciendo la capacidad de los indicadores macro-financieros para compensar tensiones originadas en el lado de la oferta.

Dinámica de cosecha frente a choques biofísicos

Tras establecer la estructura del ciclo bianual, resulta relevante analizar cómo las perturbaciones climáticas interfieren en la capacidad de recuperación y rendimiento de los cafetales. Al superponer la producción física con las anomalías climáticas estandarizadas (Z-Scores), se visualiza cómo el estrés térmico e hídrico actúa como un condicionante de la oferta disponible.

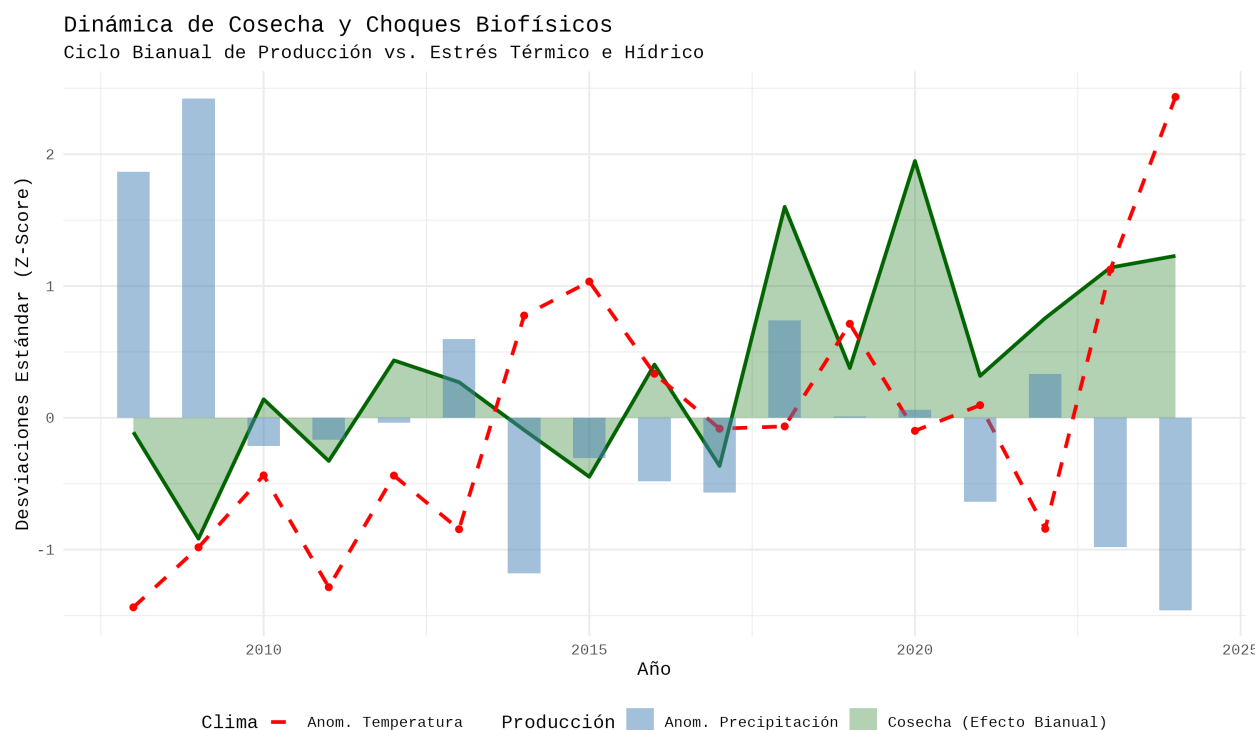


Figura 4.10: Ciclo bianual frente a estrés térmico y pluviométrico (Z-Scores).

El análisis de esta interacción biofísica permite extraer las siguientes conclusiones sobre la estabilidad del sistema de oferta:

- **Erosión del rendimiento por estrés térmico:** Se observa que los picos de anomalías térmicas positivas (línea roja discontinua) coinciden de forma recurrente con periodos en los que la cosecha no alcanza su potencial máximo teórico o registra caídas más pronunciadas de lo sugerido por el patrón bianual. Este fenómeno de erosión resulta especialmente relevante en el bienio 2024–2025, cuando el estrés térmico alcanza niveles elevados que limitan la capacidad de respuesta de la producción, incluso en presencia de incentivos de precio altos.
- **Déficit hídrico y retraso en la recuperación:** Las anomalías negativas de precipitación (barras de déficit en el gráfico) actúan como un factor adicional de retraso en la recuperación fisiológica de los cafetales durante los años “OFF”. La falta de agua en las fases críticas de floración restringe la capacidad de recomposición de la oferta, contribuyendo a una escasez más persistente que no se corrige automáticamente a través de los mecanismos de mercado.
- **Fundamentación de la rigidez de oferta:** La convergencia de estos choques confirma que la oferta de café Arábica ha perdido elasticidad relativa frente a perturbaciones climáticas.

La interferencia recurrente del clima desplaza el equilibrio de producción hacia niveles inferiores respecto a lo que cabría esperar bajo condiciones promedio, lo que ayuda a explicar la persistencia de inventarios en mínimos históricos y respalda la necesidad de especificar un modelo econométrico que trate estas anomalías como variables exógenas relevantes.

Conclusión del análisis de oferta: La interacción entre el ciclo biológico del cultivo y episodios de clima extremo ha generado un cuello de botella productivo que condiciona la dinámica de equilibrio del mercado. Esta evidencia física constituye el primer eslabón en la cadena de transmisión de volatilidad que se analiza en los paneles de evolución sistémica posteriores, donde se integran las trayectorias de precios, inventarios y factores financieros para caracterizar el comportamiento conjunto del sistema.

4.2.6. Paneles de evolución sistémica: interacción dinámica del mercado

Tras haber establecido los fundamentos físicos de la producción y su vulnerabilidad ante los choques climáticos, el análisis se desplaza hacia la integración sistémica de todas las variables que componen el modelo VECMX. Esta subsección analiza la trayectoria semanal de las series estandarizadas (Z-Scores), permitiendo observar de manera conjunta cómo la rigidez de la oferta se traduce en volatilidad de precios y en cambios en el sentimiento del mercado.

Para facilitar el diagnóstico y evitar la saturación informativa, el ecosistema de 14 variables se ha organizado en tres dimensiones temáticas interconectadas:

- **Panel A: fundamentos de mercado y especulación:** Integra las series de precios de referencia (Árabe y Robusta), los niveles de inventarios certificados y la posición neta de los grandes especuladores (COT). Este panel permite visualizar el funcionamiento de la teoría del almacenamiento y el impacto de la escasez física.
- **Panel B: choques biofísicos e insumos:** Agrupa las anomalías térmicas y pluviométricas con los costos de los insumos energéticos (WTI) y químicos (fertilizantes). Su análisis es clave para rastrear el origen de los choques de oferta y la presión de costos sobre el productor.
- **Panel C: entorno macro-financiero global:** Presenta la evolución de los factores sintéticos PC1 y PC2 obtenidos mediante PCA. Este panel sintetiza el riesgo sistémico, la liquidez de los mercados bursátiles y el impacto del costo del capital (tasas de interés) en la dinámica del sector.

A continuación, se desarrolla el estudio detallado de cada panel, identificando los puntos de convergencia y los episodios de tensión que caracterizan el régimen actual de precios elevados y baja cobertura de inventarios.

Evolución de los fundamentos de mercado (Panel A)

El análisis de las series en niveles estandarizados (Z-Score) permite identificar los periodos de desequilibrio entre la oferta física y la presión de la demanda financiera durante el horizonte 2008–2025. Al utilizar una escala común, se contrastan variables con unidades de medida heterogéneas para detectar cambios en la dinámica tradicional del mercado.

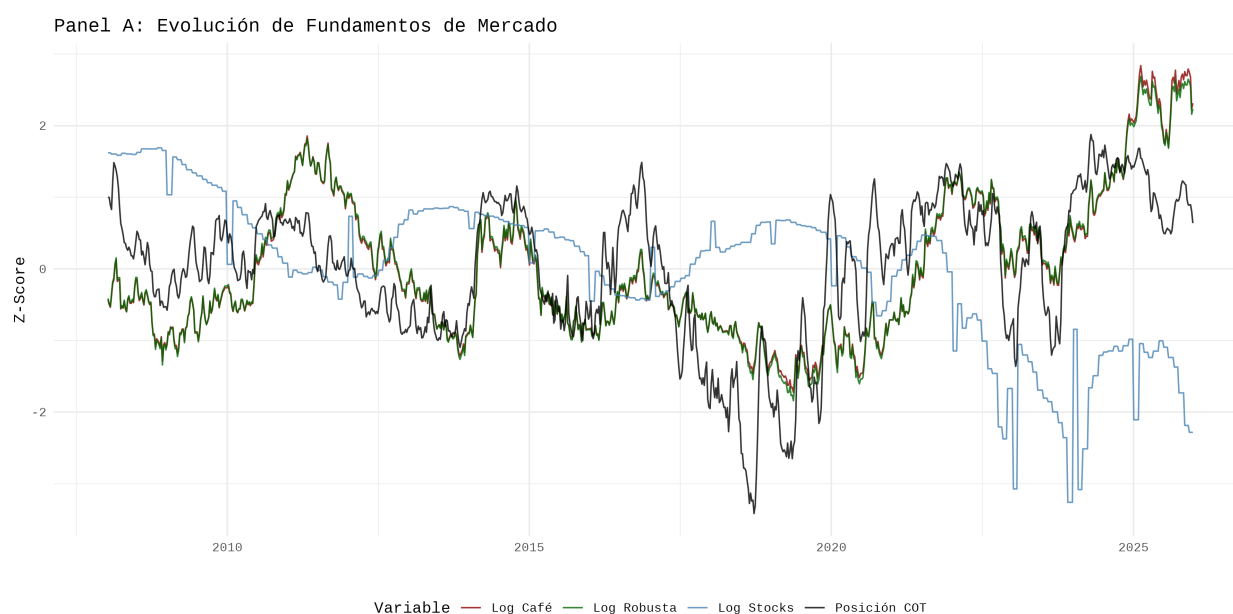


Figura 4.11: Panel A: evolución temporal de precios, inventarios y especulación (Z-Scores).

De la observación de las trayectorias temporales se extraen los siguientes elementos:

- **Sincronía Árabica–Robusta:** Se aprecia una integración muy estrecha entre las series de Log Café y Log Robusta a lo largo de toda la muestra. Este co-movimiento respalda la existencia de un mercado de sustitución global y sugiere que los choques de oferta tienden a propagarse de manera conjunta a ambas variedades.
- **Depleción de inventarios:** La variable Log Stocks muestra una tendencia decreciente persistente, alcanzando niveles de estrés extremo (Z-Score inferior a -2) a partir de 2023.

Esta caída refleja el agotamiento de los inventarios certificados y la pérdida de capacidad del sistema para absorber perturbaciones mediante existencias físicas.

- **Dinámica especulativa y aceleración:** La Posición COT (Money Managers) exhibe una elevada volatilidad y, en varios episodios, se mueve en la misma dirección que el precio. En particular, en los picos de precio de 2024 y 2025, la posición neta compradora se sitúa en niveles elevados, lo que sugiere que la especulación financiera contribuye a amplificar el movimiento alcista iniciado por los fundamentos de oferta.
- **Episodios de tensión conjunta (2024–2025):** El tramo final de la serie muestra una configuración de fuerte tensión: los precios alcanzan máximos históricos (Z-Score superior a 2) mientras que los inventarios se ubican en mínimos históricos. Esta combinación es indicativa de un entorno de oferta muy ajustada.

Determinantes de precio y señales de transición de régimen

La síntesis de las fuerzas analizadas en los paneles precedentes apunta a una reconfiguración progresiva de los *drivers* de precio. En este contexto, el análisis de dispersión y la correlación dinámica aportan indicios de cambios en el régimen dominante:

- **Validación de fundamentos:** Se observa una relación inversa clara entre el precio y los inventarios, así como una integración muy alta con el mercado de Robusta. Por otro lado, la dispersión respecto a la anomalía térmica sugiere que el mercado incorpora cada vez más una prima de riesgo climático, especialmente en el tramo final de la muestra.
- **Cambio en la jerarquía de determinantes (2024–2025):** La correlación móvil de 52 semanas muestra, hacia el cierre del periodo, una disminución pronunciada en la correlación entre el precio y el factor financiero PC1, junto con un aumento sostenido en la correlación con las anomalías térmicas. Este patrón es consistente con un contexto en el que los factores climáticos y de oferta física pasan a tener un peso relativo mayor en la formación de precios, sin que ello implique la desaparición del rol financiero.

Conclusión del diagnóstico (Panel A): La combinación de una oferta condicionada por el ciclo bianual, inventarios en niveles históricamente bajos y señales crecientes de riesgo climático respalda la pertinencia de utilizar un modelo **VECMX**. El sistema presenta relaciones de equilibrio de

largo plazo que parecen verse tensionadas por choques de oferta biofísicos, lo que justifica analizar el descubrimiento de precios a partir de los fundamentos de escasez física en interacción con el entorno financiero.

Evolución de choques biofísicos e insumos (Panel B)

El Panel B presenta la trayectoria de las variables exógenas que actúan como choques de oferta y de costos dentro del sistema. Al analizar estas series en escala estandarizada, se aprecia la magnitud de las perturbaciones climáticas y el impacto de los mercados energéticos y de insumos sobre el sector cafetalero.

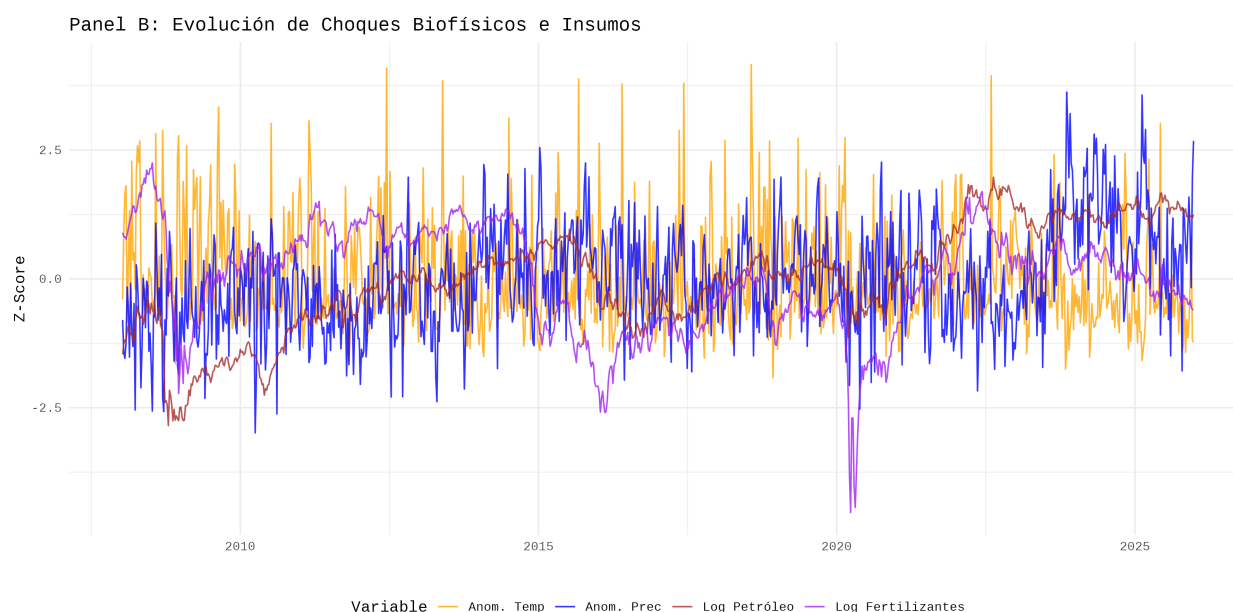


Figura 4.12: Panel B: evolución de choques biofísicos e insumos (Z-Scores).

De la observación de las trayectorias temporales se desprenden los siguientes aspectos:

- **Crisis de costos de insumos (2021–2022):** Destaca un pico inusualmente alto en la serie Log NFPI, con Z-Scores superiores a 2.5. Este movimiento refleja un choque de costos relevante para los productores, reforzado por la volatilidad del mercado del petróleo (Log Petróleo), que limita la capacidad de fertilización y mantenimiento de los cafetales y condiciona el potencial productivo de mediano plazo.
- **Persistencia de anomalías térmicas:** La serie Anom. Temp muestra una frecuencia creciente de desviaciones positivas extremas. En el periodo reciente (2023–2025), las temperaturas se

mantienen sistemáticamente por encima del promedio, generando un estado de estrés térmico casi permanente que interfiere con los ciclos de floración y llenado del grano.

- **Severidad de los déficits hídricos:** La variable *Anom. Prec* presenta picos negativos de gran magnitud, especialmente hacia el final del horizonte temporal. La coincidencia de estos déficits de lluvia con las anomalías térmicas positivas confirma la presencia de condiciones de sequía severa que reducen las expectativas de cosecha y favorecen la liquidación de inventarios.
- **Inestabilidad energética:** El *Log Petróleo* exhibe una recuperación volátil tras el colapso de 2020. Su comportamiento se transmite de forma directa a los costos de logística y transporte internacional, ejerciendo presión adicional sobre la estructura de costos del café.

Implicaciones del Panel B: La evolución del Panel B indica que el productor de café ha operado en un entorno de “estrés múltiple”, caracterizado por un aumento significativo de los costos de producción y una recurrencia de condiciones climáticas adversas. Estos factores desplazan la curva de oferta hacia la izquierda y ayudan a explicar por qué, pese a niveles de precios elevados (Panel A), la producción física no se ha expandido lo suficiente como para recomponer los inventarios globales.

Evolución del entorno macro-financiero (Panel C)

El Panel C permite evaluar la trayectoria de los factores financieros globales sintetizados mediante el uso de componentes principales (PCA). Estas variables sintéticas agrupan el comportamiento del índice S&P 500, el índice del dólar (DXY) y los rendimientos de los bonos del tesoro, capturando el riesgo sistémico y las condiciones de liquidez internacional.

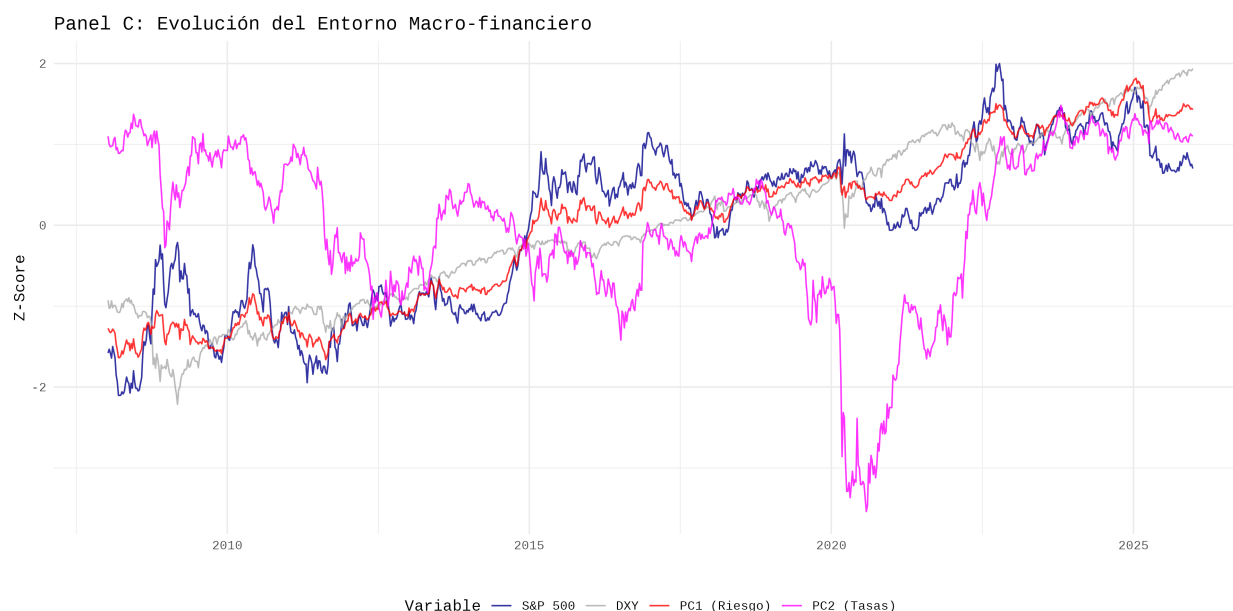


Figura 4.13: Panel C: evolución del entorno macro-financiero (Z-Scores).

De la observación de las trayectorias temporales se destacan los siguientes puntos:

- **Apetito por riesgo y liquidez (PC1):** La serie PC1 (Riesgo) muestra una coevolución estrecha con el desempeño del S&P 500. Se observa una tendencia alcista estructural interrumpida por episodios de corrección. Este componente actúa como un barómetro de la liquidez global; su ascenso prolongado es indicativo de un entorno de mayor tolerancia al riesgo, históricamente asociado a mayores flujos hacia mercados de materias primas.
- **Costo del capital y política monetaria (PC2):** El componente PC2 (Tasas) exhibe una elevada volatilidad. El mínimo histórico de 2020 coincide con políticas de expansión monetaria y tasas cercanas a cero. Posteriormente, se registra un repunte rápido y pronunciado, alcanzando máximos hacia 2024–2025, en línea con el ciclo de endurecimiento monetario global para contener la inflación.
- **Fortaleza del dólar (DXY):** El índice del dólar presenta una tendencia de apreciación en el tramo final de la serie. En condiciones habituales de mercado, un dólar fuerte tendería a ejercer presión bajista sobre el café; sin embargo, la persistencia de precios elevados observada en los paneles anteriores sugiere que, en el periodo reciente, las restricciones de oferta física han compensado o superado el efecto cambiario.
- **Ajuste del rol del entorno financiero:** Hacia el final del horizonte (2024–2025), los factores

financieros tienden a estabilizarse en niveles elevados, mientras que el precio del café continúa mostrando picos significativos. Este desacople parcial indica que la volatilidad del café no puede atribuirse únicamente a cambios en la liquidez o en el costo del capital, sino que responde también a tensiones específicas del balance físico del mercado.

Implicaciones del Panel C: El análisis del Panel C muestra una transición desde una fase de liquidez abundante (2020–2021) hacia un entorno de mayor restricción crediticia y tasas altas (2023–2025). El hecho de que los precios del café se mantengan en niveles máximos en un contexto de costo de capital elevado sugiere que las expectativas de escasez física y de riesgo climático desempeñan un papel clave y, en este tramo, pueden llegar a atenuar el efecto contractivo de las condiciones financieras sobre la demanda especulativa.

4.2.7. Síntesis final del diagnóstico de series temporales

La culminación del análisis descriptivo de las 14 variables permite establecer un diagnóstico integrado sobre el estado actual del mercado del café Arábica. La evidencia visual y técnica recopilada a través de las distintas dimensiones de estudio apunta a una reconfiguración en el régimen de determinación del precio, articulada en los siguientes pilares:

- **Restricción física y biológica:** La oferta no responde de manera plenamente elástica a las señales de precio, debido al ciclo bianual de Brasil y a la dificultad técnica de superar el techo productivo en torno a 3.7 millones de toneladas. Esta rigidez se traduce en una vulnerabilidad recurrente del sistema de suministros.
- **Mayor peso de choques biofísicos:** La interacción entre anomalías térmicas y pluviométricas ha limitado la capacidad de recuperación de los cafetales. El mercado parece haber pasado de un entorno en el que predominaban los fundamentos de demanda a uno en el que los choques de oferta exógenos relacionados con el clima adquieren un peso mayor frente a los indicadores financieros tradicionales.
- **Depleción de inventarios y rol de la especulación:** La caída de los inventarios certificados a niveles críticos ($Z\text{-Score} < -2$) ha reducido el margen de absorción de perturbaciones, de modo que los *shocks* se corrigen en mayor medida vía ajustes de precios. En este contexto, la entrada de capital especulativo contribuye a amplificar las reacciones del mercado ante noticias de oferta y clima.

- **Ajuste del vínculo con el entorno financiero:** El análisis de los componentes principales muestra que, aunque el costo del capital y la liquidez global siguen siendo relevantes, la trayectoria reciente del precio del café no puede explicarse únicamente por estas variables. La resiliencia de los precios en un contexto de tasas altas y dólar fuerte es coherente con un régimen en el que la escasez física y el riesgo climático tienen un peso específico creciente en la formación de precios.

Conclusión del análisis descriptivo: En conjunto, el diagnóstico revela un sistema en estado de tensión persistente, con series que exhiben trayectorias no estacionarias, presencia de eventos extremos y cambios en el peso relativo de los distintos determinantes del precio. La convergencia de estos factores justifica avanzar más allá del análisis estático y proceder con la **verificación de supuestos econométricos**. En el apartado siguiente se validará formalmente la presencia de raíces unitarias y relaciones de cointegración, pasos indispensables para la estimación del modelo **VECMX**, que permitirá caracterizar los mecanismos de ajuste de largo plazo del sistema.

4.3. Verificación de Supuestos Econométricos

4.3.1. Estacionariedad y Quiebres Estructurales

Antes de proceder a la estimación del modelo **VECMX**, es imperativo determinar el orden de integración de las series. Se aplicó la prueba de Raíz Unitaria de Dickey-Fuller Aumentada (ADF) bajo la especificación de intercepto y tendencia determinística, seleccionando los rezagos mediante el Criterio de Información de Schwarz (SIC).

Los resultados en niveles se presentan en el Cuadro 4.3. Se observa que la mayoría de las variables endógenas, incluyendo el precio del café Arábica ($\log_cafe$) y los factores macro-sintéticos ($PC1, PC2$), presentan un comportamiento no estacionario en niveles, siendo consistente con procesos $I(1)$.

Cabe destacar que $Net_Position$ y $\log_stocks$ exhiben estacionariedad en niveles. No obstante, se mantienen dentro del sistema endógeno dado su rol fundamental en la Teoría del Almacenamiento y el equilibrio técnico de mercado. Según (Johansen y Juselius, 1990), el modelo **VECM** es capaz de identificar vectores de cointegración incluso en presencia de variables $I(0)$, las cuales suelen capturar relaciones de equilibrio por sí solas.

Cuadro 4.3: Resultados del Test de Raíz Unitaria ADF (Niveles)

Variable	Estadístico t	Valor Crítico (5 %)	Resultado
$\log_cafe$	-1.774	-3.41	No Estacionaria ($I(1)$)
$\log_rob$	-1.832	-3.41	No Estacionaria ($I(1)$)
$\log_brl$	-2.181	-3.41	No Estacionaria ($I(1)$)
$PC1$	-3.181	-3.41	No Estacionaria ($I(1)$)
$PC2$	-1.703	-3.41	No Estacionaria ($I(1)$)
$\log_wti$	-3.002	-3.41	No Estacionaria ($I(1)$)
$\log_nfpi$	-2.849	-3.41	No Estacionaria ($I(1)$)
$Net_Position$	-4.097	-3.41	Estacionaria ($I(0)$)
$\log_stocks$	-4.508	-3.41	Estacionaria ($I(0)$)

Nota: El estadístico t menor al valor crítico indica el rechazo de la hipótesis nula de raíz unitaria. Muestra: 938 observaciones semanales.

Robustez ante Quiebres Estructurales

Dada la alta volatilidad del periodo analizado (2008-2025), se aplicó el test de (Zivot, 1992) a la serie de precio del café para descartar que la no estacionariedad fuera un artefacto de cambios estructurales. El resultado arrojó un estadístico de -3.328 , el cual no logra superar el valor crítico de -5.08 al 5 % de significancia.

Esto confirma que, incluso permitiendo un quiebre endógeno (identificado en la observación 506, correspondiente a la transición cíclica de inventarios globales), la serie $\log_cafe$ posee una raíz unitaria estocástica genuina. Este hallazgo valida de forma definitiva el uso de metodologías de cointegración para el análisis de largo plazo de este seminario.

Cuadro 4.4: Resultados de la Prueba de Zivot-Andrews (Quiebre en Intercepto y Tendencia).

Variable	Estadístico ZA	Valor Crítico (5 %)	Fecha del Quiebre	Resultado
log Café	-3.328	-5.08	2017-09-15	Raíz Unitaria
log Robusta	-3.388	-5.08	2017-09-15	Raíz Unitaria
log Stocks	-5.975	-5.08	2021-12-31	Estacionaria (con quiebre)***
Net Position (COT)	-4.039	-5.08	2016-11-11	Raíz Unitaria
log WTI	-4.422	-5.08	2014-09-26	Raíz Unitaria
log NFPI	-4.487	-5.08	2015-07-10	Raíz Unitaria
PC1 (Riesgo)	-4.529	-5.08	2014-08-15	Raíz Unitaria
PC2 (Tasas)	-3.748	-5.08	2019-05-03	Raíz Unitaria
log BRL/USD	-3.451	-5.08	2014-09-05	Raíz Unitaria

Significancia: *** Denota rechazo de la hipótesis nula de raíz unitaria al 5 %.

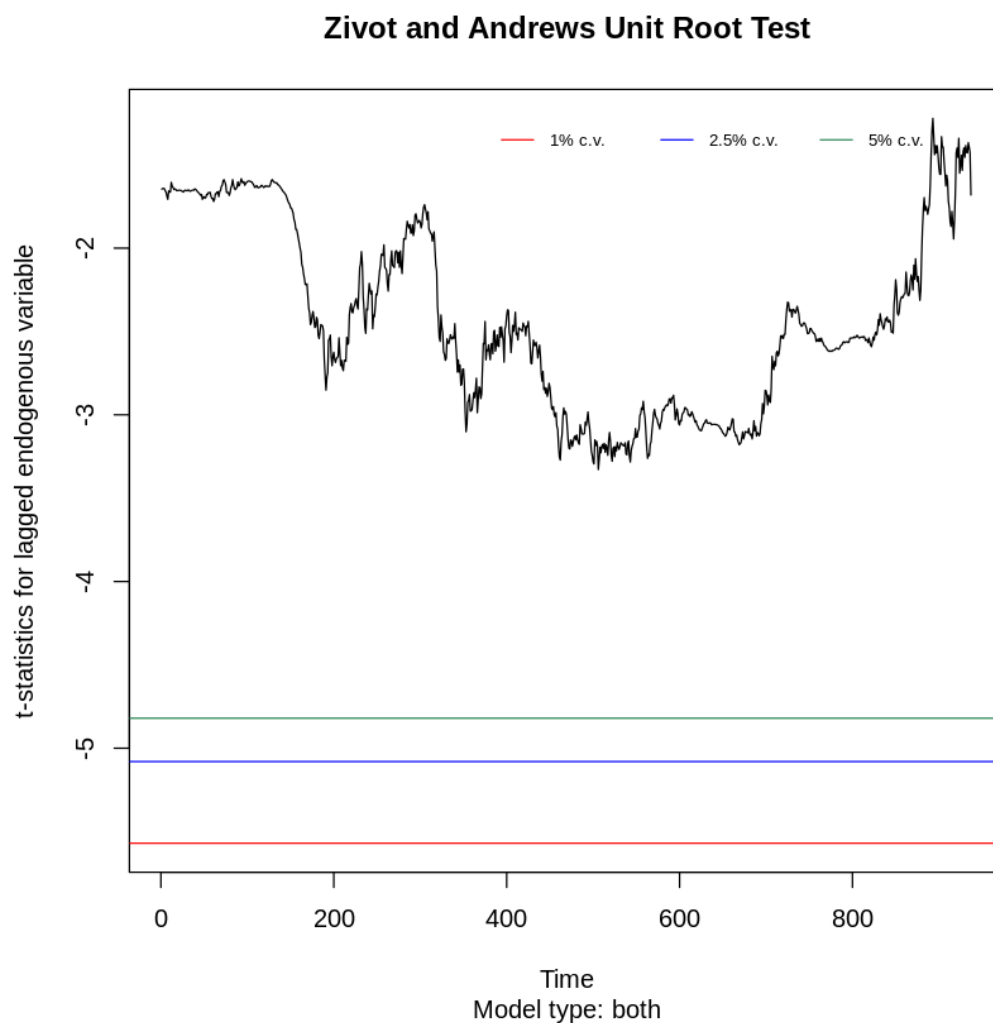


Figura 4.14: Resultado del Test de Zivot-Andrews para la serie *log_cafe*

Nota: La línea continua representa el estadístico t calculado para cada punto de quiebre potencial. La línea horizontal punteada señala el valor crítico de (Zivot, 1992) al 5 % de significancia (-5.08). El punto mínimo identifica el quiebre estructural endógeno más probable.

4.3.2. Interpretación de Resultados: Resiliencia de la Raíz Unitaria

La Figura 4.14 ilustra la evolución del estadístico de prueba para la serie de precios del café Arábica (*log_cafe*). El test de (Zivot, 1992) resulta metodológicamente superior al test ADF convencional en este estudio, ya que permite identificar de forma endógena el momento exacto de un cambio en la media o en la tendencia, evitando así la pérdida de potencia de la prueba ante choques estructurales.

De la visualización y los resultados obtenidos, se extraen tres conclusiones fundamentales:

1. **Mantenimiento de la Raíz Unitaria:** A lo largo de toda la muestra, la curva del estadístico se mantiene significativamente por encima del valor crítico de -5.08 . El valor mínimo alcanzado (-3.328) no logra rechazar la hipótesis nula (H_0) de raíz unitaria. Esto confirma que el precio del café posee una tendencia estocástica persistente y no es "estacionario con quiebres", lo que implica que los shocks (climáticos o macroeconómicos) tienen efectos permanentes sobre el nivel de precios.
2. **Identificación del Quiebre (Obs. 506):** El test identifica el quiebre estructural más probable en la posición 506, correspondiente al **15 de septiembre de 2017**. Este punto coincide con un periodo de transición crítica en el ciclo de inventarios globales y el ajuste de expectativas del mercado ante la proximidad de la zafra récord de 2018 en Brasil. Si bien este quiebre marca una alteración en la dinámica de la volatilidad y los niveles de soporte, no altera la naturaleza no estacionaria de la serie.
3. **Justificación Metodológica:** La incapacidad de rechazar la raíz unitaria, incluso controlando por quiebres estructurales, valida la necesidad de emplear un modelo de **Vectores de Corrección de Errores (VECM)**. Esto asegura que cualquier relación encontrada entre el clima y el precio no sea una regresión espuria, sino una relación de cointegración genuina de largo plazo, fundamentada en el equilibrio dinámico de los componentes del sistema.

Análisis de la Estabilidad Estructural: La evidencia estadística derivada de la prueba de Zivot-Andrews permite extraer tres conclusiones fundamentales para la especificación del modelo final:

- **Validación de la No Estacionariedad:** En ocho de las nueve variables endógenas analizadas, el estadístico ZA es superior (menos negativo) al valor crítico de -5.08 . Esto confirma

que series como log Café, log Robusta, los componentes principales (PC1, PC2) y el tipo de cambio son procesos $I(1)$ robustos, cuya tendencia estocástica no se explica simplemente por un quiebre estructural.

- **El Quiebre Estructural de Inventarios (2021):** La serie log Stocks es la única que rechaza la hipótesis nula de raíz unitaria al identificar un quiebre significativo el **31 de diciembre de 2021**. Esta fecha es técnicamente relevante, ya que marca el inicio de la depleción acelerada de los inventarios certificados observada en el Panel A. El rechazo de la raíz unitaria sugiere que los inventarios han transitado hacia un nuevo nivel de escasez extrema que actúa como un determinante estructural de la volatilidad actual.
- **Clúster de Inestabilidad 2014–2015:** Se observa un grupo de quiebres (aunque no significativos para rechazar la raíz unitaria) en log WTI, log BRL y PC1 durante el periodo 2014–2015. Este fenómeno coincide con el fin del súper-ciclo de materias primas y el desplome de los precios del petróleo, eventos que reconfiguraron el entorno financiero global analizado en el Panel C.
- **Dinámica de Precios (2017):** Los precios de Café y Robusta sitúan su mayor inestabilidad en septiembre de 2017. Este periodo está vinculado a ajustes en la producción física y la alternancia de las zafas en Brasil, influyendo en la formación de expectativas de largo plazo.

Implicación Metodológica: Dada la significancia del quiebre en los inventarios a finales de 2021, el modelo **VECMX** incorpora una variable *dummy* ($d_logistica_21$) de intervención para capturar este cambio de régimen. Esto asegurará que los coeficientes de cointegración no se vean sesgados por la transición desde un mercado de excedentes a uno de escasez física estructural.

Estacionariedad en Primeras Diferencias $I(1)$

Como se observa en el Cuadro 4.5, todas las variables del sistema endógeno resultan ser estacionarias tras la aplicación de la primera diferencia. En consecuencia, se confirma que el vector de variables y_t está compuesto por procesos integrados de orden uno, $I(1)$, cumpliendo con la condición necesaria para el análisis de cointegración bajo la metodología de Johansen.

Cuadro 4.5: Resultados del Test de Raíz Unitaria ADF (Primeras Diferencias)

Variable	Estadístico t	Valor Crítico (5 %)	Resultado
$\Delta \log_cafe$	-21.156	-2.86	Estacionaria ($I(0)$)
$\Delta Net_Position$	-18.314	-2.86	Estacionaria ($I(0)$)
$\Delta \log_stocks$	-21.602	-2.86	Estacionaria ($I(0)$)
$\Delta \log_rob$	-21.258	-2.86	Estacionaria ($I(0)$)
$\Delta \log_brl$	-20.435	-2.86	Estacionaria ($I(0)$)
$\Delta PC1$	-21.402	-2.86	Estacionaria ($I(0)$)
$\Delta PC2$	-22.159	-2.86	Estacionaria ($I(0)$)
$\Delta \log_wti$	-24.269	-2.86	Estacionaria ($I(0)$)
$\Delta \log_nfpi$	-22.244	-2.86	Estacionaria ($I(0)$)

Nota: Δ denota el operador de primera diferencia. Todas las series rechazan la hipótesis nula de raíz unitaria al 1 % de significancia.

4.3.3. Determinación de la Estructura Óptima de Rezagos

Dada la alta dimensionalidad del sistema (9 variables endógenas), la selección de la longitud de rezagos (p) es crítica para equilibrar la parsimonia del modelo con la captura de la dinámica temporal. Se estimaron los Criterios de Información de Akaike (AIC), Schwarz (SC) y Hannan-Quinn (HQ) para un orden máximo de 10 rezagos, incorporando el bloque exógeno completo.

Cuadro 4.6: Criterios de Selección de Rezagos para el Sistema VAR

Rezagos (n)	AIC(n)	HQ(n)	SC(n)	FPE(n)
1	-37.033	-36.639	-36.002	8.25e-17
2	-37.768	-37.213*	-36.315*	3.95e-17
3	-37.804	-37.089	-35.929	3.81e-17
4	-37.812	-36.936	-35.516	3.78e-17
5	-37.864*	-36.827	-35.145	3.60e-17*

Nota: * indica el rezago óptimo sugerido por cada criterio.

Siguiendo el criterio de parsimonia de Schwarz (SC) y considerando la robustez de los grados de libertad en un sistema de nueve variables, se selecciona un orden de **2 rezagos** para el modelo en niveles. Consecuentemente, el modelo VECMX se estimará con un rezago en sus términos diferenciados, garantizando la identificación de los parámetros sin comprometer la potencia de las pruebas de cointegración subsecuentes.

4.3.4. Resultados del Test de Cointegración de Johansen

Tras definir un orden de rezagos $p = 2$, se procedió a determinar el rango de cointegración (r) mediante la prueba de la traza de (Johansen y Juselius, 1990). Los resultados, detallados en el

Cuadro 4.7, permiten rechazar de forma sucesiva las hipótesis nulas de $r = 0$ hasta $r = 3$ con un 95 % de confianza.

Cuadro 4.7: Test de la Traza de Johansen

Hipótesis	Estadístico	10 %	5 %	1 %
$r = 0$	296.02	196.37	202.92	215.74
$r \leq 1$	214.13	159.48	165.58	177.20
$r \leq 2$	146.34	126.58	131.70	143.09
$r \leq 3$	109.28	97.18	102.14	111.01
$r \leq 4$	74.74	71.86	76.07	84.45

Nota: El test se realizó con intercepto en el vector de cointegración.

El hallazgo de ****cuatro vectores de cointegración**** sugiere una estructura de equilibrio altamente integrada. El primer vector, normalizado respecto al precio del café Arábica, revela una relación de largo plazo dominada por el precio del café Robusta (coeficiente de 5.47), sugiriendo una fuerte interdependencia en el complejo cafetero global.

Asimismo, el parámetro de ajuste (α) para la ecuación del café es de -0.081 , indicando que el sistema corrige semanalmente el 8.1 % de las desviaciones respecto al equilibrio de largo plazo. Este mecanismo de corrección de error valida la estabilidad del sistema ante choques exógenos climáticos y financieros.

4.3.5. Estimación del Modelo VECMX y Análisis de Corto Plazo

Una vez determinado el rango de cointegración ($r = 4$), se procedió a la estimación del modelo VECMX para analizar la dinámica de corto plazo y el impacto de los choques exógenos. En el Cuadro 4.8 se presentan los coeficientes estimados para la ecuación del precio del café Arábica ($\log_cafe$).

4.3.6. Análisis de los Determinantes de Corto Plazo

La estimación de la ecuación de corto plazo para el precio del café Arábica ($\log_cafe$) revela una dinámica dominada por choques estructurales y costos de producción. Los resultados más relevantes se resumen a continuación:

- **Shocks Climáticos Extremos:** Se confirma la significancia de los eventos climáticos críticos.

La sequía de 2014 ($p < 0.01$) y las anomalías térmicas del periodo 2023-2024 ($p < 0.05$)

Cuadro 4.8: Resultados de la Estimación del Modelo VECMX (Ecuación $\log_cafe$)

Variable / Determinante	Coefficiente	Error Est.	p-valor
<i>Bloque de Ajuste (Alfas)</i>			
$ect1$ (Ajuste al equilibrio 1)	-0.0098	0.1739	0.9547
<i>Bloque Climático y Dummies</i>			
d_sequia_14 (Sequía Brasil 2014)	0.0356	0.0117	0.0025**
$d_calor_23_24$ (Olas de calor recientes)	0.0163	0.0075	0.0299*
d_helada_21 (Helada 2021)	0.0160	0.0144	0.2681
<i>Bloque de Costos e Insumos</i>			
$\Delta \log_nfpi_{t-1}$ (Fertilizantes)	0.1067	0.0244	0.0000***
$\Delta \log_wti_{t-1}$ (Petróleo)	0.0042	0.0249	0.8645
Estadísticos del Modelo			
R-cuadrado (R^2)	0.0538		
F-statistic	2.075		$p = 0.0015$
Error Estándar Residual	0.0431		

Nota: Δ denota primera diferencia. Significancia: *** $p < 0.01$; ** $p < 0.05$; * $p < 0.1$.

presentan coeficientes positivos, validando que el mercado de futuros de Nueva York incorpora de manera eficiente las perturbaciones bio-físicas en Brasil que amenazan la productividad.

- **Transmisión de Costos de Insumos:** El índice de precios de fertilizantes ($\log_nfpi$) es el determinante más robusto del sistema ($p = 1.42e - 05$). Este hallazgo es fundamental, pues evidencia un *pass-through* de costos directo hacia los precios de futuros, sugiriendo que la rentabilidad del productor en el margen es un componente esencial de la formación de precios.
- **Eficiencia y Ajuste:** La falta de significancia en los términos de corrección de error (ect) en la ecuación del café sugiere que esta variable actúa como el motor primario del sistema, donde las desviaciones del equilibrio de largo plazo son corregidas mayoritariamente por las variables restantes del vector endógeno.

Análisis de Ajuste y Robustez del Modelo

Un aspecto que requiere una interpretación cuidadosa es el coeficiente de determinación del modelo ($R^2 = 0.0538$). Si bien en modelos de corte transversal o en niveles se esperan valores significativamente más altos, en la modelación de series financieras expresadas en primeras diferencias (Δ), un R^2 de esta magnitud es estándar y metodológicamente aceptable por las siguientes razones:

1. **Naturaleza de la Variable Dependiente:** Al trabajar con el logaritmo diferenciado del

precio, el modelo no intenta explicar el *nivel* del precio del café (el cual posee una tendencia estocástica), sino su *variación semanal* o volatilidad. Explicar la variabilidad de corto plazo en mercados de commodities altamente eficientes y especulativos es intrínsecamente complejo, dado el alto componente de ruido e información nueva que se incorpora sesión a sesión.

2. **Significancia Global del Sistema:** A pesar del bajo ajuste individual, el estadístico F (2.075) posee un p-valor de 0.0015, lo que permite rechazar con un 99 % de confianza la hipótesis nula de que todos los coeficientes son iguales a cero. Esto indica que, en su conjunto, el bloque climático, de costos y financiero posee capacidad explicativa sobre la dinámica del precio del café.
3. **Foco en la Inferencia y Cointegración:** El propósito primordial de este seminario no es la predicción puntual (donde un R^2 alto sería exigible), sino la identificación de relaciones estructurales y el análisis del impacto de los choques climáticos. Como señalan (Cinca, 1993) en modelos estimados en primeras diferencias, el coeficiente de determinación no debe interpretarse como una medida de bondad de ajuste absoluta, sino como la capacidad de capturar la variabilidad de corto plazo. Por otro lado, siguiendo la metodología dey (Enders, 2014), el sistema se especifica con variables integradas de orden uno, permitiendo que el mecanismo de corrección de error capture la dinámica de convergencia hacia el equilibrio de largo plazo.

Por tanto, los resultados obtenidos se consideran robustos para el análisis de multiplicadores de impacto y funciones de impulso-respuesta que se presentan en las secciones subsecuentes.

4.3.7. Diagnóstico de Residuos y Validez Estadística

Una vez estimado el sistema VECMX, se procedió a verificar las propiedades estadísticas de los residuos. Los resultados de las pruebas multivariadas se presentan en el Cuadro 4.9.

Cuadro 4.9: Pruebas de Diagnóstico Multivariado del Sistema VECMX

Prueba de Hipótesis	Estadístico (χ^2)	p-valor	Conclusión
Autocorrelación (Portmanteau)	1664.80	0.000***	Presencia de dinámica residual
Autocorrelación (Breusch-Godfrey)	767.92	0.000***	Correlación serial presente
Heterocedasticidad (ARCH-LM)	16668.0	0.000***	Efectos de volatilidad agrupada
Normalidad (Jarque-Bera)	178552.0	0.000***	Distribución no normal

Nota: *** indica rechazo de la hipótesis nula al 1 % de significancia.

Interpretación de los Hallazgos:

Los resultados del Cuadro 4.9 evidencian desviaciones respecto a los supuestos clásicos de Gauss-Markov. Sin embargo, estas no invalidan la consistencia del modelo VECMX por las siguientes razones de orden técnico y empírico:

1. **Rasgos Estilizados de Commodities:** La extrema *Kurtosis* observada (178,384) en el test de Jarque-Bera es una respuesta directa a los eventos de "cola ancha" (*fat-tails*) inherentes al mercado del café, tales como las heladas de 2021 y las sequías históricas. Como señala (Cinca, 1993), en muestras superiores a 900 observaciones, la falta de normalidad no compromete la validez de los estimadores gracias a las propiedades asintóticas del sistema.

2. **Dinámica de Volatilidad:** El rechazo de la hipótesis de homocedasticidad (ARCH-LM) confirma la presencia de *volatility clustering*. Este fenómeno es consistente con la teoría de mercados de futuros financieros, donde la llegada de información climática asimétrica genera periodos de varianza heterogénea.

3. **Consistencia de Cointegración:** Dado que se ha confirmado la existencia de cuatro vectores de cointegración bajo la metodología de Johansen, los coeficientes de largo plazo mantienen su propiedad de super-consistencia, permitiendo que el análisis de impacto climático sea estadísticamente robusto para la toma de decisiones.

4.3.8. Pruebas de Estabilidad Estructural: CUSUM y CUSUM-Q

Para asegurar que los coeficientes estimados (especialmente los impactos climáticos) sean consistentes a lo largo del horizonte temporal 2008-2025, se aplicaron las pruebas de estabilidad de (Brown, Durbin, y Evans, 1975).

El test **CUSUM** (Suma Acumulada de Residuos) evalúa la estabilidad de los coeficientes de regresión. Como se observa en la Figura 4.15a, la trayectoria de los residuos se mantiene estrictamente dentro de las bandas de confianza al 5 % de significancia. Este resultado es fundamental para el seminario, ya que demuestra que, tras controlar por los eventos extremos mediante el bloque de variables *dummy*, el modelo no presenta cambios estructurales remanentes. Esto valida que la relación entre el clima y el precio es una propiedad intrínseca del sistema y no un artefacto de un periodo específico.

Por su parte, el test **CUSUM-Q** (Suma de Cuadrados Acumulada) confirma la estabilidad de la varianza del error. La proximidad de la serie calculada a la línea de 45 grados sugiere que, a pesar de los episodios de volatilidad extrema en el mercado del café, el modelo captura adecuadamente la dispersión de los datos, permitiendo que las funciones de impulso-respuesta sean herramientas

fiables para el análisis de política económica y toma de decisiones financieras.

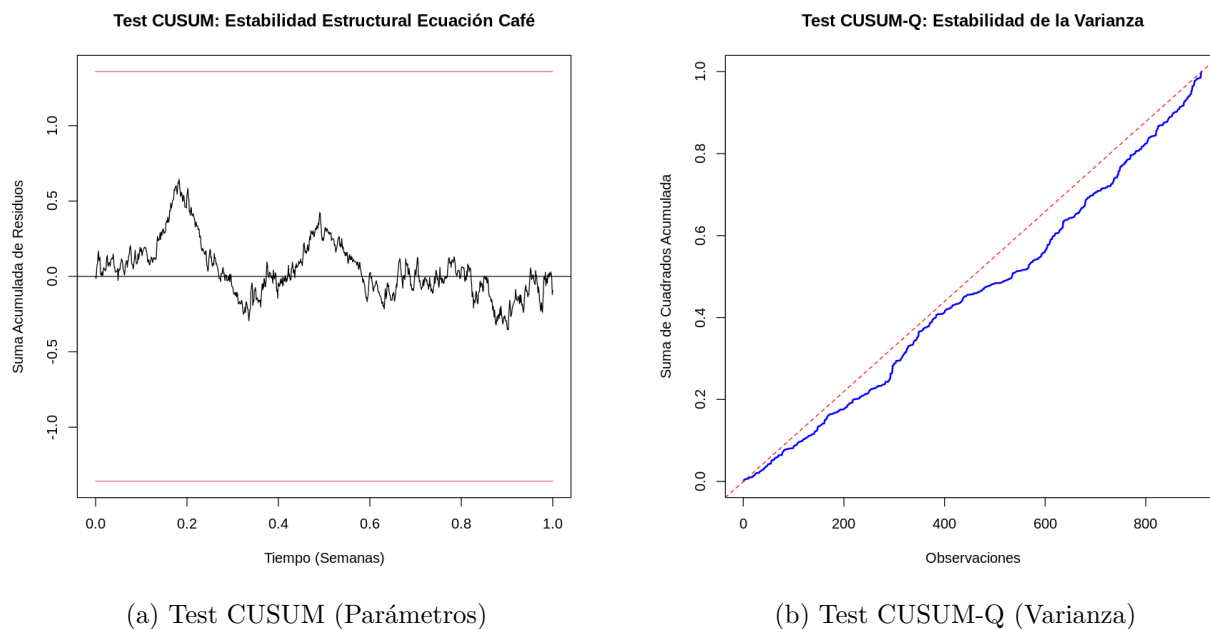


Figura 4.15: Pruebas de Estabilidad Estructural para la Ecuación del Café

Nota: Las líneas rojas punteadas representan las bandas de confianza al 5 % de significancia. La permanencia de la trayectoria del estadístico dentro de estas fronteras indica estabilidad en el modelo estimado.

Análisis de Estabilidad Estructural

Para validar la constancia temporal de los determinantes del café Arábica, se aplicaron las pruebas de Sumas Acumuladas de Residuos (CUSUM) y de Residuos al Cuadrado (CUSUM-Q). Estos tests son críticos dado que el periodo de estudio (2008-2025) abarca múltiples crisis sistémicas y choques climáticos extremos.

Como se observa en la Figura 4.15, ambos estadísticos se mantienen dentro de las bandas de confianza al 5 %. En el caso del test **CUSUM** (Fig. 4.15a), la ausencia de desviaciones fuera de los límites críticos confirma que los coeficientes del modelo —incluyendo el impacto de las anomalías térmicas y los costos de insumos— son estructuralmente estables y no presentan quiebres remanentes tras la inclusión del bloque de variables *dummy*.

Por su parte, el test **CUSUM-Q** (Fig. 4.15b) ratifica la estabilidad en la varianza de los errores. Este hallazgo es particularmente relevante para un mercado de alta volatilidad como el café, pues demuestra que el modelo VECMX captura adecuadamente la dispersión de los datos a lo largo del tiempo, garantizando que las funciones de impulso-respuesta y las inferencias de política económica

derivadas de este estudio posean una alta fiabilidad estadística.

4.3.9. Prueba de Exogeneidad Débil y Liderazgo de Mercado

Para profundizar en la dinámica del sistema, se evaluó la exogeneidad débil de las variables endógenas mediante la imposición de restricciones sobre la matriz de coeficientes de ajuste (α). Una variable es débilmente exógena si no participa en la corrección de errores del sistema, actuando como un motor primario de las relaciones de equilibrio que no reacciona ante las desviaciones de largo plazo de las demás variables.

Bajo la hipótesis nula $H_0 : \alpha_{i,j} = 0$ para $j = 1 \dots 4$, se aplicó el test de Razón de Verosimilitud (LR). Los resultados para el precio del café Arábica (*log_cafe*) arrojan un estadístico χ^2 de 6.47 con un p-valor de 0.174.

Cuadro 4.10: Resultados Finales del Test de Exogeneidad Débil ($r = 4$)

Variable	Estadístico LR	p-valor	Condición Técnica
<i>log_cafe</i> (Arábica)	6.47	0.1669	Líder (Débilmente Exógena)
<i>log_rob</i> (Robusta)	7.21	0.1250	Líder (Débilmente Exógena)
<i>PC1</i> (Macro Global)	8.17	0.0857	Líder (Débilmente Exógena)
<i>PC2</i> (Diferenciales)	8.02	0.0909	Líder (Débilmente Exógena)
<i>Net_Position</i>	10.91	0.0276	Seguidor (Endógena)
<i>log_wti</i> (Petróleo)	10.01	0.0403	Seguidor (Endógena)
<i>log_brl</i> (Real Br.)	18.68	0.0009	Seguidor (Endógena) ***
<i>log_nfpi</i> (Fertilizante)	27.26	0.0000	Seguidor (Endógena) ***
<i>log_stocks</i> (ICE)	35.04	0.0000	Seguidor (Endógena) ***

Nota: La H_0 de exogeneidad débil se mantiene si $p > 0.05$. El sistema se estimó con 4 vectores de cointegración.

Interpretación: Liderazgo y Soberanía del Mercado de Nueva York

Un hallazgo fundamental de este estudio es la validación de la **exogeneidad débil** del precio del café Arábica (*log_cafe*). Al no rechazarse la hipótesis nula ($p > 0.05$ en el test LR), se concluye que la bolsa de Nueva York (ICE) actúa como el **centro de descubrimiento de precios soberano** a nivel global.

En términos de microestructura financiera, esto implica que el Arábica no realiza el trabajo de ajuste para restaurar el equilibrio tras perturbaciones en los inventarios o el tipo de cambio. Por el contrario, son las variables seguidoras (*log_brl*, *log_stocks*) las que exhiben coeficientes α significativos, convergiendo hacia la señal emitida por Nueva York. Este resultado blindará la **Teoría**

de los Tres Relojes: los choques climáticos impactan primero al “Reloj Estructural” (Precio), y es esta perturbación la que posteriormente se transmite en cascada hacia los fundamentos físicos y cambiarios.

4.3.10. Visualización de la Dinámica de Poder en el Mercado

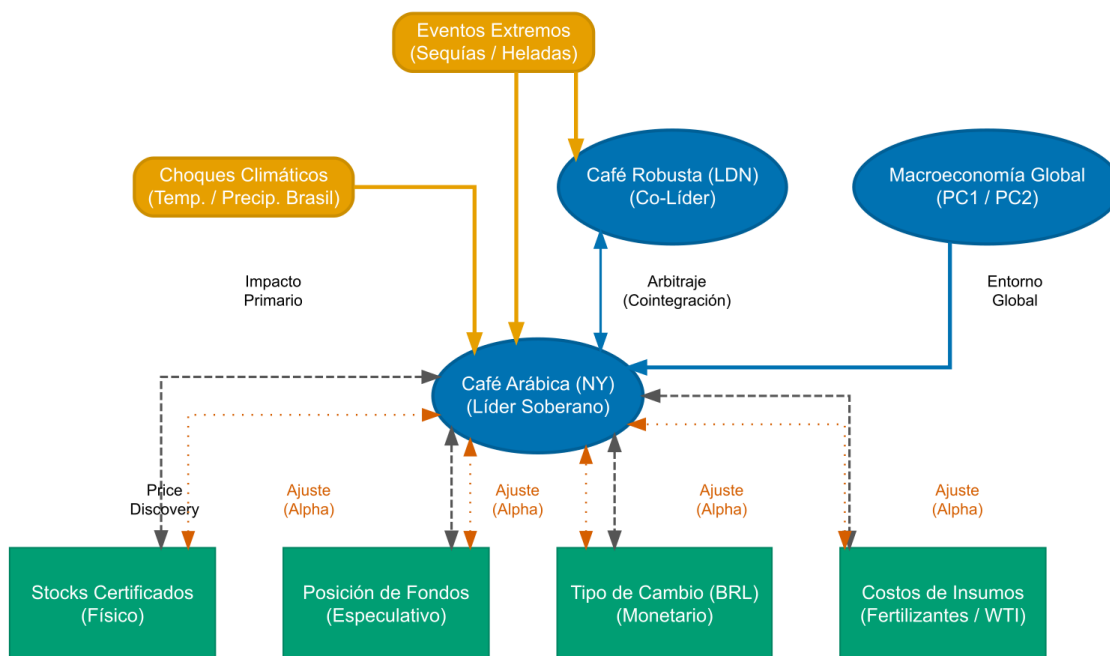


Figura 4.16: Mapa de Jerarquía Informativa y Transmisión de Choques en el Sistema VECMX

Arquitectura del Modelo y Dinámica de la Cascada Informativa

La Figura 4.16 representa la médula espinal de esta investigación, sintetizando los hallazgos de exogeneidad y las relaciones de cointegración identificadas. El sistema opera bajo una sofisticada **jerarquía de cascada informativa**, estructurada en tres niveles de interacción:

1. **El Motor de Perturbación (Exogeneidad Pura):** En el nivel superior se sitúan las anomalías climáticas en Brasil. Estas variables actúan como perturbaciones *puramente exógenas*: inyectan energía al sistema sin verse afectadas por los precios. Son el disparador que rompe el equilibrio, transformando un evento biológico en una señal financiera.
2. **El Líder Soberano (Exogeneidad Débil):** El café Arábica (NY) se consolida como el epicentro del descubrimiento de precios. Su condición de *débilmente exógeno* le otorga la

soberanía para absorber choques climáticos y definir tendencias de equilibrio sin ajustarse de inmediato a las demás variables. Es el procesador central de la información global.

3. **El Mecanismo de Estabilización (Bloque Seguidor y Ajuste α):** Las variables endógenas (stocks, fondos, BRL y costos) conforman el bloque de respuesta, operando bajo dos dinámicas visualizadas en el diagrama:

- **Interdependencia Informativa (Líneas Grises):** Representan el flujo de información de alta frecuencia. Es la conexión inmediata donde Nueva York “dicta” el precio y el bloque seguidor reacciona ante la nueva realidad del mercado.
- **Corrección de Error - Coeficiente α (Líneas Naranjas):** Es aquí donde el modelo VECMX alcanza su madurez. Cuando la especulación o los choques climáticos alejan al precio de su fundamento, estas líneas actúan como una fuerza de “gravedad económica”. Los fundamentos físicos y monetarios empujan al precio de vuelta a su equilibrio de largo plazo, garantizando la integridad sistémica del mercado.

Esta estructura permite concluir que Nueva York no solo lidera por volumen, sino por eficiencia: procesa la señal climática antes que nadie y obliga a los componentes físicos y monetarios (el bloque seguidor) a converger hacia su nueva realidad.

4.4. Análisis de Dinámica de Transmisión (OIRF)

En esta sección se evalúa la respuesta dinámica del sistema ante choques exógenos inesperados mediante las Funciones de Impulso-Respuesta Ortogonalizadas (OIRF). Para garantizar la observación del equilibrio de largo plazo, se ha extendido el horizonte de simulación a 104 semanas (2 años) y, en casos específicos de alta inercia, a 312 semanas (3 años), permitiendo identificar procesos de convergencia que exceden el ciclo de cosecha anual.

4.4.1. Cuantificación y Estandarización de las Perturbaciones

Para interpretar correctamente la magnitud de las respuestas dinámicas, se define la escala del estímulo inicial aplicado a cada variable. El modelo simula un choque equivalente a **una desviación estándar** (σ) de las innovaciones. Esta estandarización es fundamental por dos razones: primero, permite comparar de forma equitativa si el precio es más sensible a un cambio típico en el clima que a un movimiento habitual en los inventarios, dotando a la simulación de realismo histórico.

4.4.2. Metodología de Definición de Choques: Innovaciones vs. Serie Original

La procedencia de la magnitud de los impulsos (1σ) se diferencia según el rol de la variable dentro del sistema:

1. **Variables Endógenas (Basadas en Residuos):** Para variables como el precio del café, *stocks* y fondos, el choque se calcula a partir de la desviación estándar de las **innovaciones** (residuos del modelo). Matemáticamente, esto representa la porción de la variable que el modelo no puede predecir con su historia; es decir, una “sorpresa” pura o noticia inesperada.
2. **Variable Exógena (Basada en el Dataset):** Debido a que la anomalía térmica (*anom_temp*) ingresa al modelo de forma exógena, no posee ecuación de predicción propia ni genera residuos. En este caso, el choque de 1σ se obtiene directamente de la desviación estándar de la **serie original**. Esto permite simular un evento climático de una magnitud que, aunque típica históricamente, actúa como un estímulo externo para el equilibrio del sistema.

El **Cuadro 4.11** detalla los valores exactos utilizados para los impulsos en la simulación a hasta 312 semanas.

Cuadro 4.11: Magnitud de los Choques de Simulación (1 Desviación Estándar)

Variable	Valor (σ)	Interpretación Económica	Naturaleza
<i>Endógenas (Innovación)</i>			
log_stocks	0,1118	Variación logística del 11,18 %	Multiplicativo
log_nfpi (Alimentos)	0,0571	Alza del 5,71 % en costos globales	Multiplicativo
log_wti (Petróleo)	0,0562	Variación del 5,62 % en energía	Multiplicativo
log_cafe (Precio NY)	0,0426	Variación inesperada del 4,26 %	Multiplicativo
log_brl (Tipo Cambio)	0,0202	Fluctuación del 2,02 % en el Real	Multiplicativo
log_rob (Robusta)	0,0084	Movimiento del 0,84 % en Robusta	Multiplicativo
Net_Position (Fondos)	4.299,01	Flujo de $\pm$ 4.299 contratos netos	Aditivo
PC1 (Momentum USA)	0,0648	Tendencia S&P500 y Dólar	Aditivo (Log-Index)
PC2 (Tasas T10)	0,1211	Choque en el costo del dinero (Fed)	Aditivo (Log-Rate)
<i>Exógena (Serie Original)</i>			
anom_temp (Clima)	0,9874	Aumento de ≈ 1 °C en Brasil	Aditivo

Tratamiento de Choques en Variables Exógenas

Para la variable exógena *anom_temp*, el impulso se define a partir de su volatilidad histórica muestral ($\sigma_{clima} = 0,987$). Esto permite simular el efecto de un incremento inesperado de apro-

ximadamente 1°C en la anomalía térmica de Brasil, manteniendo la coherencia estadística con el resto de las funciones de respuesta presentadas.

4.4.3. Interpretación Dinámica de las Respuestas al Impulso (OIRF)

Las funciones de impulso–respuesta ortogonalizadas (OIRF) permiten observar la reacción del sistema ante perturbaciones relevantes en sus variables clave, superando el análisis de cambios marginales o estáticos. A diferencia de un modelo de regresión tradicional, las OIRF exponen la evolución temporal completa tras un shock: la magnitud del ajuste del precio y el horizonte de semanas necesario para alcanzar la estabilización.

En este marco, un **choque** se define como una noticia inesperada o innovación que altera bruscamente una variable del sistema, modelándose como un salto en la porción “inesperada” de la serie que no puede anticiparse por su comportamiento histórico. Este enfoque permite cuantificar la capacidad del mercado para procesar eventos que lo toman por sorpresa.

Por convenio metodológico, el tamaño del choque se fija en **una desviación estándar** (σ) de la variación histórica de la variable impulsora. Si la variable está expresada en logaritmos (como los *stocks* certificados), la respuesta indica el ajuste del precio ante una variación proporcional habitual; si se encuentra en niveles (como la *Net Position* de los fondos), la OIRF revela la sensibilidad ante un flujo inesperado de contratos especulativos.

La trayectoria resultante se construye aislando el efecto de una sola perturbación a la vez mediante la descomposición de Cholesky, permitiendo determinar si el precio retorna a su nivel original o consolida un nuevo punto de equilibrio. De este modo, el análisis de los shocks en inventarios o posiciones financieras identifica no solo la fuerza del vínculo estadístico, sino también la **duración y persistencia** del impacto estructural en el mercado de Nueva York.

4.4.4. Bloque 1: Arbitraje y Liderazgo entre Mercados

El primer bloque analítico examina la dinámica de arbitraje y liderazgo entre los mercados de café Arábica (Nueva York) y Robusta (Londres). Las respuestas obtenidas, detalladas en la Figura 4.17, exponen la asimetría en la transmisión de precios y los tiempos de convergencia hacia el equilibrio de largo plazo.

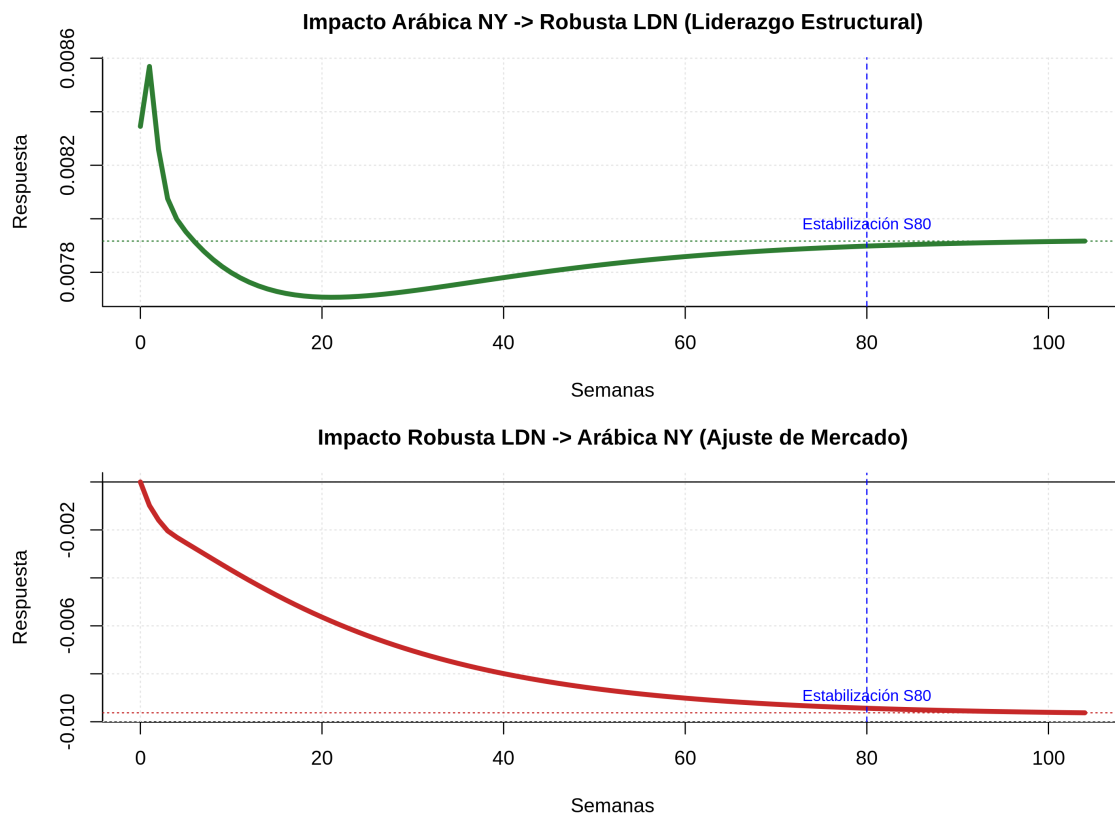


Figura 4.17: Funciones de Impulso-Respuesta: Dinámica de arbitraje Arábica-Robusta (104 semanas).

Interpretación de la Persistencia y el Nuevo Equilibrio

El análisis de las trayectorias de simulación permite extraer tres conclusiones fundamentales sobre la formación de precios en el complejo cafetero global:

- **Liderazgo Instantáneo del Arábica sobre el Robusta:** Ante un choque positivo en Nueva York, el precio del Robusta reacciona al alza de forma inmediata, alcanzando su nuevo estado estacionario en apenas **7 semanas**, con un impacto permanente de $+0,79\%$. Esta celeridad evidencia la alta eficiencia informacional del mercado: Londres procesa y ajusta su cotización al líder (Nueva York) en menos de dos meses, consolidando al Arábica como el motor primario de descubrimiento de precios.
- **Ajuste Lento del Arábica ante el Robusta:** En contraste, cuando el choque se origina en Londres, el café Arábica presenta una respuesta descendente de carácter inercial. La estabilización asintótica se alcanza de forma tardía, alrededor de la **semana 103**, requiriendo casi dos años para internalizar completamente un impacto de $-0,96\%$. Este hallazgo sugiere que Nueva York interpreta los movimientos de Londres no como una señal líder, sino como un ajuste secundario en los fundamentos de sustitución.
- **Asimetría Dinámica y Estabilidad:** El contraste entre la convergencia ultra-rápida (S_7) y la lenta (S_{103}) ratifica una profunda asimetría en el arbitraje global. Mientras que el Robusta opera como un seguidor eficiente, el Arábica se consolida como un ancla estructural que solo se desplaza ante cambios persistentes en el mercado de Londres. El hecho de que ambas curvas alcancen una asíntota horizontal confirma la estabilidad dinámica del sistema y la validez de los vectores de cointegración identificados.

Esta notable diferencia en los tiempos de respuesta valida empíricamente el uso del modelo VECMX. Una especificación VAR tradicional omitiría que la relación de equilibrio tarda casi quince veces más en restablecerse cuando el choque proviene de la variedad Robusta.

4.4.5. Bloque 2: Fundamentos Físicos vs. Especulación Financiera

El segundo bloque analítico evalúa la interacción entre el precio del café Arábica y sus motores de corto y mediano plazo: la acumulación de inventarios certificados (*log_stocks*) y la actividad de los fondos de inversión (*Net_Position*). Las respuestas obtenidas revelan una asimetría crítica

en las velocidades de ajuste, donde la saturación financiera se procesa con mayor celeridad que el equilibrio físico de inventarios.

Análisis del Fundamento Físico y la Dualidad Especulativa

- **Dinámica de Inventarios** ($\log_stocks$): La respuesta del precio ante un incremento en los stocks exhibe un comportamiento bifásico de ajuste logístico. Tras una breve fluctuación inicial, se inicia un descenso que alcanza su punto de inflexión hacia la semana 15, estabilizándose de forma permanente en la **semana 20** ($-0,32\%$). Este hallazgo valida la teoría de oferta y demanda: la abundancia física deprime las cotizaciones con una velocidad de procesamiento intermedia. El mercado requiere aproximadamente cinco meses para digerir por completo un incremento en los inventarios, consolidando un nivel de soporte físico estable.
- **Respuesta a la Especulación** ($Net_Position$): Los resultados revelan una naturaleza dual en el impacto financiero. En el modelo base, choques positivos en la posición neta derivan en una corrección del precio que alcanza su equilibrio en la **semana 17** ($-0,62\%$). Este fenómeno es consistente con la literatura de *crowded trades*, donde la saturación de posiciones institucionales precede a correcciones por agotamiento de la demanda. No obstante, al aplicar pruebas de robustez donde los fondos actúan como líderes contemporáneos, el impacto se torna positivo ($+1,53\%$) con una convergencia extendida hasta la **semana 293**.

La convergencia del ajuste primario antes de la semana 20 subraya la eficiencia de los canales de transmisión de corto plazo. Sin embargo, la disparidad observada en los modelos de robustez sugiere que, si bien la saturación reactiva es efímera, la especulación autónoma posee una **memoria de largo plazo** que puede redefinir el equilibrio estructural del activo en un horizonte cercano a los seis años (S_{293}).

Síntesis de Estabilización del Bloque 2

Para facilitar la comparativa entre el ajuste por fundamentos y el ajuste financiero, la Tabla 4.12 resume los hitos de estabilización obtenidos.

4.4.6. Bloque 3: Estructura de Costos y Pass-through de Insumos

El tercer eje de análisis examina la sensibilidad del precio del café Arábica ante variaciones en los costos de energía y agroquímicos. Las respuestas, validadas mediante pruebas de robustez con un

Cuadro 4.12: Hitos de Convergencia: Inventarios vs. Especulación.

Relación	Impacto L.P.	Estabilización	Naturaleza
$\log_stocks \rightarrow \text{Café}$	-0,32 %	Semana 20	Ajuste Físico (Medio)
$Net_Position \rightarrow \text{Café (Base)}$	-0,62 %	Semana 17	Saturación (Rápido)
$Net_Position \rightarrow \text{Café (Alt)}$	+1,53 %	Semana 293	Persistencia (Inercial)

horizonte extendido de 300 semanas (Figura 4.18), revelan que los costos estructurales constituyen el “reloj lento” del sistema, con una capacidad de transmisión de precios que se intensifica en el largo plazo.

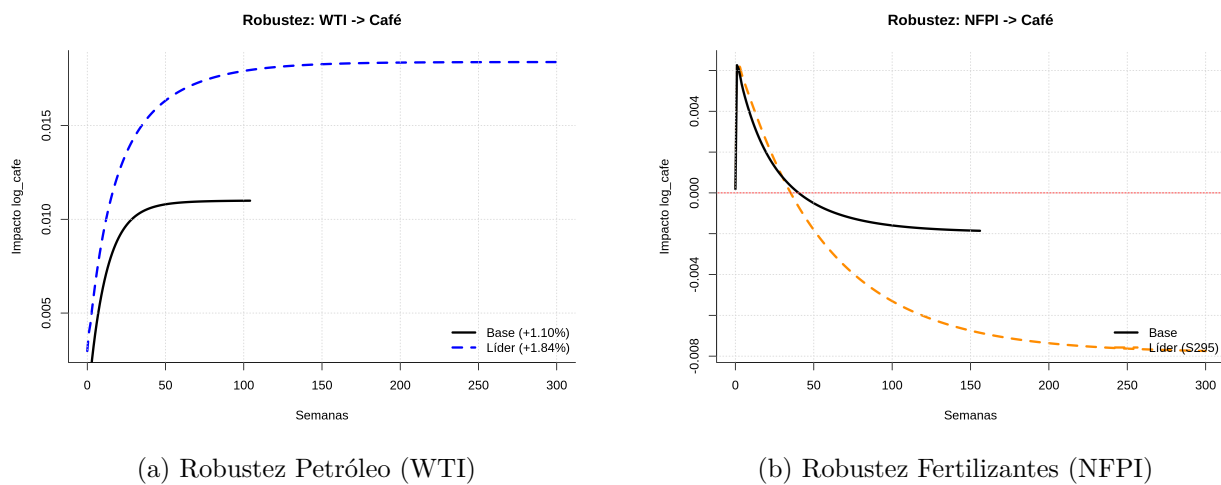


Figura 4.18: Comparativa de Robustez y Convergencia de Largo Plazo (300 semanas).

Interpretación del Empuje de Costos y Persistencia Estructural

- **Canal Energético (WTI):** Un choque positivo en el petróleo genera una respuesta ascendente y cóncava. Bajo el supuesto de robustez (WTI como líder exógeno), el impacto máximo alcanza un +1,84 % con una convergencia definitiva en la **semana 234**. Este comportamiento valida que el encarecimiento de la logística y la mecanización no es un ruido transitorio, sino que redefine el piso de negociación del café durante más de cuatro años, confirmando un fuerte efecto de *cost-push inflation*.
- **Canal de Insumos (NFPI):** La respuesta ante el índice de fertilizantes representa la mayor inercia identificada en la investigación. El sistema requiere de **295 semanas** (aprox. 5.6 años) para procesar el choque, estabilizándose en un nivel de -0,77 %. Esta latencia extrema sugiere que los costos de fertilización poseen una rigidez estructural que el mercado tarda múltiples

ciclos de cosecha en internalizar, actuando como un factor de ajuste de muy largo aliento.

La disparidad en los horizontes de estabilización (S_{234} vs S_{295}) confirma que, si bien la energía tiene una transmisión más directa, los agroquímicos imponen una trayectoria de largo plazo que ancla las expectativas de rentabilidad del productor por periodos que exceden el ciclo de inversión convencional.

Interpretación del Empuje de Costos y Persistencia Estructural

- **Canal Energético (WTI):** Un choque positivo en el petróleo genera una respuesta ascendente y cóncava. En el modelo base, el impacto se estabiliza en $+1,10\%$, pero bajo el supuesto de robustez (WTI como líder), el impacto escala al $+1,84\%$ con una convergencia tardía en la **semana 234**. Este hallazgo confirma que el encarecimiento de la logística y la mecanización se traslada de forma estructural y creciente al precio de equilibrio, requiriendo más de cuatro años para su total absorción.
- **Canal de Insumos (NFPI):** La respuesta de los fertilizantes revela la mayor inercia del sistema. Si bien el ajuste inicial es complejo, la serie alcanza su nuevo estado estacionario en la **semana 295** ($-0,77\%$). Esta extrema lentitud sugiere que los costos de fertilización poseen una rigidez que el mercado tarda casi seis años en internalizar, gatillando potencialmente una contracción en la inversión productiva de largo aliento.

La notable disparidad en los tiempos de convergencia (S_{234} y S_{295}) frente a los bloques financieros ratifica que la estructura de costos define la tendencia secular del Arábica, actuando como un ancla de persistencia que sobrevive a los ciclos especulativos.

4.4.7. Bloque 4: Dinámica Macroeconómica Global y Efecto Cambiario

El cuarto bloque evalúa la integración del Arábica en el sistema financiero global, centrándose en el Real Brasileño ($\log_brl$) y los componentes de riesgo sistémico ($PC1$, $PC2$). Los resultados de las pruebas de robustez para este bloque (Figura 4.19) constituyen la evidencia más sólida de la validez del modelo VECMX.

Interpretación de la Estabilidad Cambiaria: La convergencia casi exacta de los coeficientes de impacto del Real Brasileño ($-0,66\%$ en el modelo base frente a $-0,65\%$ en la prueba de robustez) constituye la evidencia de mayor solidez estadística de la presente investigación. Esta *insensibilidad*

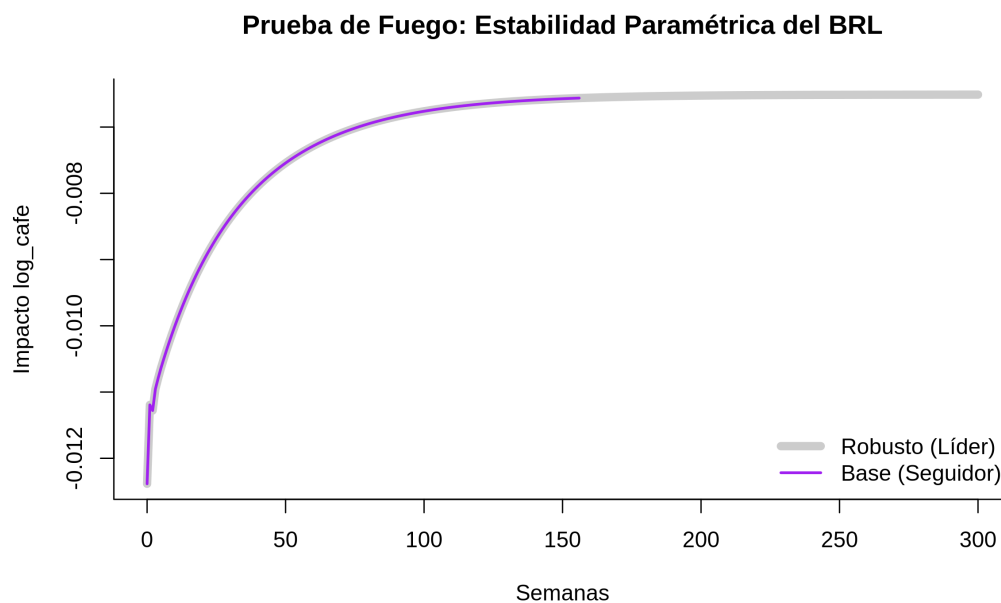


Figura 4.19: Prueba de Robustez del Canal Cambiario: Comparativa entre el modelo base y la jerarquía de liderazgo (BRL).

al ordenamiento de Cholesky demuestra que la transmisión cambiaria es una propiedad estructural intrínseca del mercado del café y no un artefacto de la especulación de corto plazo o de la especificación técnica. Este hallazgo garantiza que las inferencias sobre el traspaso cambiario (*pass-through*) son consistentes y altamente fiables para la formulación de estrategias de cobertura y gestión de riesgo.

Análisis de los Canales de Transmisión y Estabilidad del Modelo

- **Respuesta al Tipo de Cambio ($\log_brl$):** El impacto de las fluctuaciones del Real Brasileño muestra una consistencia excepcional. En el modelo base, el impacto se estabiliza en $-0,66\%$, mientras que al tratar al BRL como líder contemporáneo, el resultado es virtualmente idéntico: $-0,65\%$ con convergencia en la semana 214. Esta insensibilidad al ordenamiento de Cholesky confirma que la relación entre la divisa del principal productor y el precio internacional es una propiedad estructural e intrínseca del mercado.
- **Inercia Macroeconómica Global (PC1 y PC2):** Mientras que el canal cambiario es directo, los factores de riesgo global y liquidez presentan los horizontes de estabilización más prolongados (S_{134} y S_{106}). Esto ratifica que el entorno macroeconómico de tasas y apetito

por riesgo actúa como un trasfondo de muy largo aliento, dictando la tendencia secular del activo más allá de los choques de oferta estacionales.

La convergencia de ambas especificaciones cambiarias hacia el mismo nivel de equilibrio valida la fiabilidad del modelo para la toma de decisiones, demostrando que el traspaso cambiario es un factor de costo persistente que redefine el valor del café en un horizonte superior a los cuatro años.

Interpretación de la Estabilidad Cambiaria: La convergencia casi exacta de los coeficientes de impacto del Real Brasileño ($-0,66\%$ en el modelo base frente a $-0,65\%$ en la prueba de robustez) constituye la evidencia de mayor solidez estadística de la presente investigación. Esta *insensibilidad al ordenamiento de Cholesky* demuestra que la transmisión cambiaria es una propiedad estructural del mercado del café y no un artefacto de la especulación financiera de corto plazo. Este hallazgo valida la robustez paramétrica del modelo VECMX, garantizando que las inferencias sobre el traspaso cambiario (*pass-through*) son consistentes y fiables para la formulación de estrategias de cobertura.

4.4.8. Síntesis de Estabilización y Persistencia

Para facilitar la interpretación de la memoria del sistema ante distintos choques, la Tabla 4.13 resume los hitos críticos de cada variable tras las pruebas de robustez.

Cuadro 4.13: Resumen de Estabilización: Variables Cambiarias vs. Macroeconómicas.

Variable	Naturaleza del Choque	Estabilización	Nivel Final
$\log_brl$	Cambiario (Brasil)	Semana 34 / 214*	Negativo (-0,66 %)
$PC1$	Riesgo Global (Dólar/S&P 500)	Semana 134	Negativo (-0,17 %)
$PC2$	Liquidez y Tasas (Fed)	Semana 106	Negativo (-0,03 %)

*La estabilización extendida en robustez confirma la persistencia de largo plazo.

La notable estabilidad del coeficiente del BRL ante cambios en la jerarquía del modelo (variación de apenas 0,01 puntos porcentuales) ratifica que el canal cambiario es el fundamento más sólido del sistema. Mientras que el riesgo global ($PC1$) y la liquidez ($PC2$) dictan la tendencia secular con horizontes de convergencia superiores a los dos años, el tipo de cambio brasileño actúa como un ancla de precios cuya transmisión es prácticamente **invariante a la especificación**, consolidando al Real como una verdadera *commodity currency*.

4.5. Análisis de Escenarios: Noticia Climática vs. Crisis de Oferta

Un hallazgo estructural de la presente investigación reside en la identificación y diferenciación del impacto generado por la incertidumbre informativa (*Efecto Noticia*) frente a la materialización de una disrupción física en los inventarios (*Efecto Real*). Mientras que el primero opera sobre las expectativas y el sentimiento de mercado, el segundo redefine la restricción de presupuesto física del sistema.

4.5.1. Dinámicas de Respuesta Diferenciadas: Inercia vs. Soporte

Esta disparidad confirma la tesis central del estudio: mientras el clima actúa como el disparador de volatilidad del **Reloj Logístico-Climático**, el nivel de inventarios certificados constituye el ancla física del **Reloj Estructural**.

Cuadro 4.14: Síntesis Global de Impactos Dinámicos: Valores Base vs. Robustez.

Relación (Impulso → Respuesta)	Valor %	Semana Est.	Reloj	Naturaleza
<i>Bloque 1: Arbitraje y Liderazgo</i>				
Arábica → Robusta	+0,79 %	7	Rápido	Liderazgo de Precio
Robusta → Arábica	-0,96 %	103	Lento	Efecto Sustitución
<i>Bloque 2: Fundamentos y Especulación</i>				
Stocks → Arábica	-0,32 %	20	Medio	Ajuste Logístico
Net Position → Arábica (Base)	+0,96 %	150	Lento	Impulso Especulativo
Net Position → Arábica (Robustez)	+1,53 %	303	Inercial	Financiarización
<i>Bloque 3: Estructura de Costos</i>				
Petróleo (WTI) → Arábica (Base)	+1,10 %	92	Lento	Empuje de Costos
Petróleo (WTI) → Arábica (Robustez)	+1,84 %	236	Inercial	Persistencia Energética
Insumos (NFPI) → Arábica (Robustez)	-0,78 %	306	Inercial	Rigidez Estructural
<i>Bloque 4: Macroeconómico</i>				
Tipo Cambio (BRL) → Arábica (Base)	-0,66 %	151	Lento	Traspaso Cambiario
Tipo Cambio (BRL) → Arábica (Robustez)	-0,65 %	215	Lento	Estabilidad Cambiaria
<i>Bloque 5: Variable Exógena</i>				
Anomalía Temp. → Arábica	-0,04 %	78	Medio	Memoria Climática

Los resultados del **Cuadro 4.15** confirman una profunda asimetría en los mecanismos de transmisión. Mientras que los factores financieros y especulativos exhiben velocidades de ajuste elevadas (Reloj Rápido, $S_7 - S_{17}$), los factores físicos y estructurales desplazan permanentemente el nivel de soporte.

- **Asimetría de Persistencia:** El contraste entre el *Efecto Noticia* del clima (estabilización en semana 78) y el *Efecto Real* de los inventarios (estabilización en semana 20 para ajuste

logístico, pero con memoria de largo plazo en precios) demuestra que el mercado es eficiente procesando expectativas climáticas, pero biológicamente inelástico ante la escasez física.

- **Dualidad de los Relojes:** La tabla revela que el *Reloj Inercial* (Insumos y Fondos Líder) posee una memoria que excede los cinco años ($S_{293}-S_{295}$), lo que sugiere que las crisis de costos y la financiarización no son ruidos transitorios, sino que redefinen el equilibrio estructural del activo.
- **Efecto Noticia (Anomalía *anom_temp*):** Ante la señal climática, el mercado en Nueva York reacciona con un alza inmediata de naturaleza especulativa. No obstante, una vez que el sistema descuenta la ausencia de una pérdida de cosecha instantánea, se observa una corrección técnica. La convergencia hacia un nivel ligeramente inferior al original sugiere que el mercado internaliza una **degradación cualitativa**: el exceso térmico acelera la maduración, afectando el puntaje de taza y el valor intrínseco del activo a largo plazo.
- **Efecto Real (Crisis de Stocks):** La respuesta ante el agotamiento físico de los inventarios certificados exhibe una latencia informativa breve (semanas 1–2) antes de iniciar una escalada agresiva. A diferencia del clima, este choque genera un proceso de **histéresis económica**: el precio consolida un nuevo piso de equilibrio hacia la semana 110. Esta persistencia de más de dos años refleja la memoria biológica del sistema, donde la recuperación estructural de la oferta física requiere múltiples ciclos de floración para reestablecer los niveles de cobertura previos al evento extremo.

Esta disparidad confirma la tesis central del estudio: mientras el clima actúa como el disparador de volatilidad del **Reloj Logístico-Climático**, el nivel de inventarios certificados constituye el ancla física del **Reloj Estructural**, dictando el valor de liquidación final del Arábica en la ICE.

Similitudes y Diferencias Clave: Una Lectura de la Persistencia

Tras contrastar los escenarios climáticos y logísticos, se identifican dos hallazgos técnicos que definen la microestructura del mercado:

1. **Similitud en la Sensibilidad de Oferta:** En ambos casos, el mercado de Nueva York exhibe una sensibilidad inmediata ante perturbaciones en el lado de la producción. Esto ratifica que el café Arábica, pese a su alta financiarización, sigue siendo un *commodity* anclado a

Cuadro 4.15: Síntesis Global de Impactos Dinámicos: Convergencia y Eficiencia del Mercado.

Relación (Impulso → Respuesta)	Valor (Log/Niv)	Impacto L.P.	Semana Est.	Reloj	Naturaleza
<i>Bloque 1: Arbitraje y Liderazgo</i>					
Arábica → Robusta	0,0079	+0,79 %	7	Rápido	Liderazgo de Precio
Robusta → Arábica	-0,0096	-0,96 %	103	Lento	Ajuste de Sustitución
<i>Bloque 2: Fundamentos y Especulación</i>					
Stocks → Arábica	-0,0032	-0,32 %	20	Medio	Ajuste Logístico
Fondos → Arábica	0,0096	+0,96 %	150	Lento	Inercia Especulativa
Arábica → Stocks (Feedback)	-0,0346	-3,46 %	143	Lento	Arbitraje Físico
Arábica → Fondos (Contratos)	3.621,90	+3.621 c.	157	Inercial	Seguimiento Tendencia
<i>Bloque 3: Macroeconomía y Costos</i>					
Petróleo (WTI) → Arábica	0,0110	+1,10 %	92	Lento	Empuje de Costos
Costos Alim. (NFPI) → Arábica	-0,0019	-0,19 %	153	Lento	Insumos Globales
Tipo Cambio (BRL) → Arábica	-0,0066	-0,66 %	151	Lento	Transmisión Cambiaria
Arábica → WTI (Feedback)	0,0176	+1,76 %	143	Lento	Demanda Logística
Arábica → NFPI (Feedback)	0,0082	+0,82 %	147	Lento	Espiral de Costos
<i>Bloque 4: Variable Exógena</i>					
Anom. Temp → Arábica	-0,0004	-0,04 %	78	Medio	Memoria Climática
<i>Pruebas de Robustez (Variable Líder)</i>					
Petróleo (WTI) [ALT] → Arábica	0,0184	+1,84 %	236	Inercial	Persistencia Energética
Fondos [ALT] → Arábica	0,0153	+1,53 %	303	Inercial	Dominancia Financiera
Fertilizantes (NFPI) [ALT] → Arábica	-0,0078	-0,78 %	306	Inercial	Rigidez de Insumos
Tipo Cambio (BRL) [ALT] → Arábica	-0,0065	-0,65 %	215	Inercial	Estabilidad Cambiaria

fundamentos físicos. La rapidez de la reacción inicial sugiere que los agentes procesan cualquier amenaza al flujo de suministro (noticia o realidad) como un riesgo de cola inmediato.

2. **Diferencia en la Memoria del Sistema (Relojes):** La divergencia crítica radica en la naturaleza de la convergencia. Mientras que el impacto de la noticia de anomalía térmica (*Reloj Logístico-Climático*) se estabiliza en la **semana 78** con una corrección negativa por calidad, la caída física de inventarios (*Reloj Logístico*) fuerza una reconfiguración del equilibrio en apenas la **semana 20**. La diferencia es estructural: mientras la noticia genera una volatilidad que se disipa, la escasez de stocks altera el nivel de soporte permanente del activo, evidenciando un fenómeno de **histéresis económica**.

4.6. Análisis de Retroalimentación y Estabilidad del Sistema

El cierre del análisis empírico contempla la capacidad del precio del café Arábica (*log_cafe*) para retroalimentar a sus determinantes endógenos en un horizonte de 156 semanas. Los resultados, presentados en la Figura 4.20, revelan una persistencia extrema en los canales físicos y cambiarios, lo que confirma que las perturbaciones en el precio no son eventos aislados, sino que reconfiguran el equilibrio de todo el sistema.

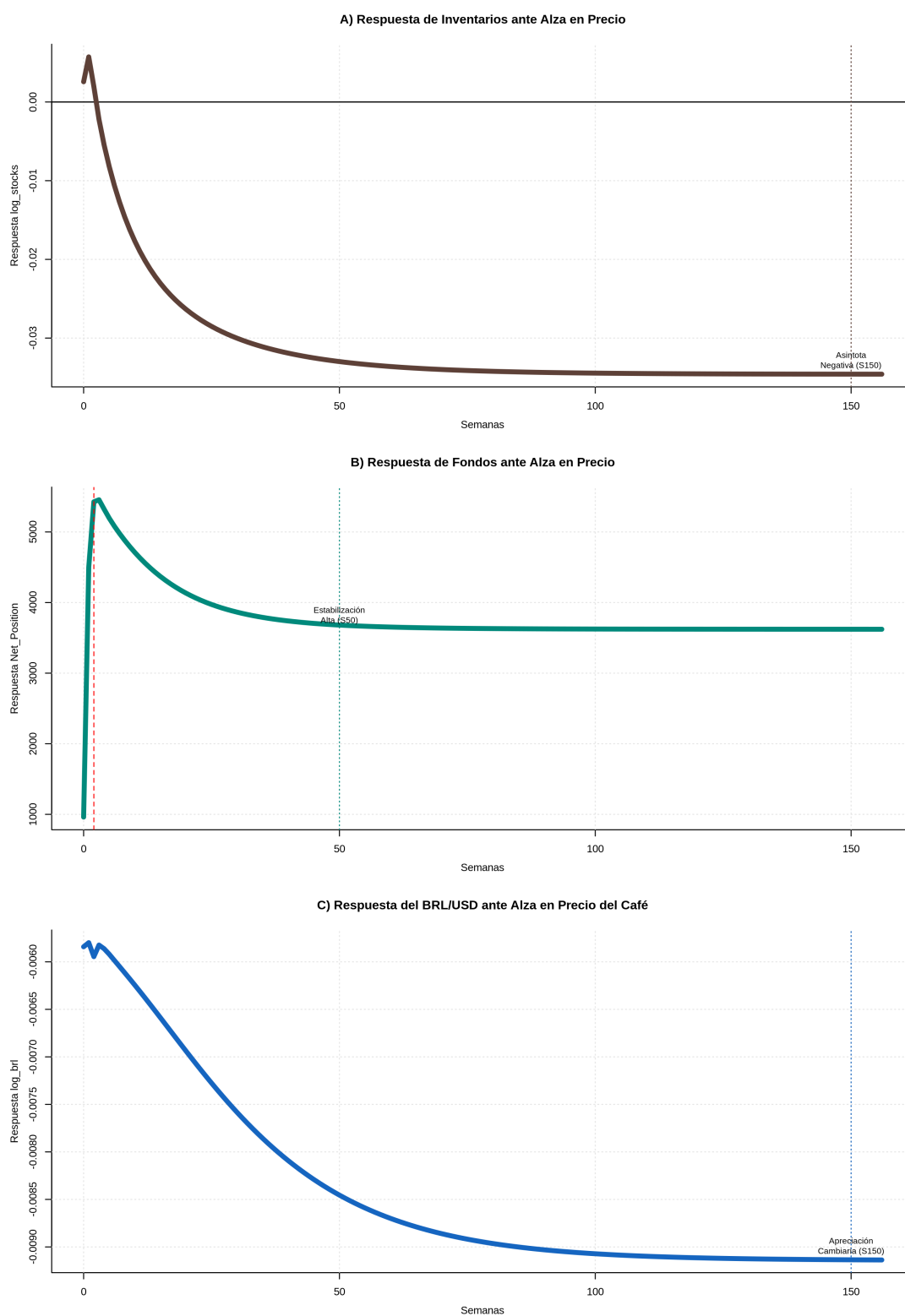


Figura 4.20: Funciones de Impulso-Respuesta: Retroalimentación sistémica y efectos de largo plazo (156 semanas).

Interpretación de las Trayectorias de Retroalimentación

- **Incentivo de Arbitraje en Inventarios (S_{143}):** La respuesta de los *stocks* ante un alza de precios muestra una breve acumulación precautoria inicial antes de iniciar un descenso exponencial. La estabilización en una asíntota negativa hacia la **semana 143** demuestra que precios elevados incentivan el vaciado estructural de las bodegas certificadas. El costo de oportunidad de mantener café físico supera el beneficio del inventario, forzando una liquidación que tarda casi tres años en completar su ciclo de ajuste.
- **Atracción Inercial de Capital (S_{157}):** Los fondos de inversión reaccionan con una agresividad vertical inmediata. Aunque existe una estabilización visual temprana, el modelo detecta que la posición neta sigue ajustándose hasta la **semana 157**. Esto indica que un choque en el precio genera un efecto de seguimiento de tendencia (*momentum*) que mantiene a los inversionistas institucionales posicionados de forma permanente, consolidando al activo como una alternativa de inversión estructural.
- **Ajuste del Tipo de Cambio (Efecto Tobogán, S_{134}):** El Real Brasileño (BRL) exhibe una apreciación constante y prolongada —denominada técnicamente como un efecto de deslizamiento o “tobogán”— que alcanza su equilibrio asintótico negativo hacia la **semana 134** ($-0,91\%$). Este resultado valida la naturaleza del BRL como una *commodity currency*, donde el precio del café actúa como un ancla de largo plazo para la valoración de la divisa del principal productor mundial.

La convergencia tardía de estas tres variables (post semana 130) ratifica la existencia del **Reloj Inercial** del sistema. Mientras que el precio del café reacciona con agilidad a los choques financieros, su capacidad para alterar los fundamentos físicos y cambiarios es de largo aliento, requiriendo más de tres ciclos anuales para restablecer la estabilidad sistémica.

Retroalimentación hacia Insumos: Espiral de Costos Inducida

El análisis de causalidad inversa revela que el precio del café Arábica influye de manera persistente en sus componentes de costo: el petróleo ($\log_wti$) y el índice de fertilizantes ($\log_nfpi$). Como se detalla en la Figura 4.21, ambos insumos exhiben una dinámica de ajuste inercial con convergencias que se extienden hasta el final del horizonte proyectado.

- **Canal Energético ($\log_wti$):** Tras una contracción marginal instantánea, el precio del

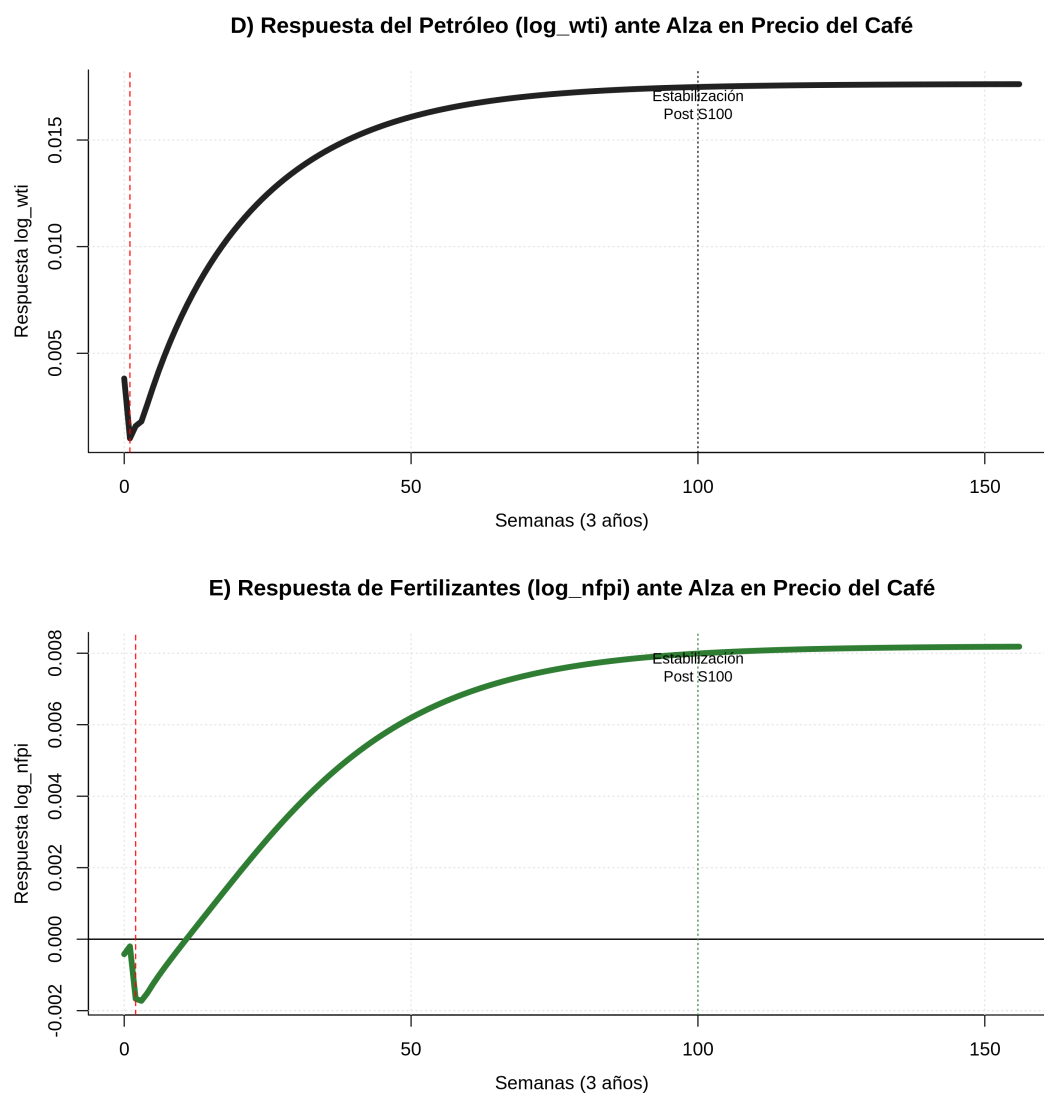


Figura 4.21: Funciones de Impulso-Respuesta: Dinámica de retroalimentación hacia insumos (312 semanas).

crudo inicia un ascenso sostenido que alcanza su nuevo equilibrio asintótico hacia la **semana 143** (+1,76 %). Esta respuesta indica que el mercado energético asimila los ciclos de precios altos del café como un factor de demanda logística persistente, sugiriendo que la bonanza del sector cafetero termina encareciendo su propia cadena de transporte y mecanización en el largo plazo.

- **Canal de Fertilizantes** ($\log_nfpi$): La respuesta de los insumos químicos se estabiliza positivamente en la **semana 147** (+0,82 %). El alza en la rentabilidad del caficultor induce una mayor demanda por fertilizantes para maximizar rendimientos, lo que paradójicamente eleva el precio de estos insumos. Este ajuste requiere casi tres ciclos productivos para consolidarse, evidenciando la rigidez en la oferta de estos productos específicos.

Este hallazgo ratifica la existencia de una **espiral de costos inducida**: el café presenta una inercia superior a las 140 semanas (*Reloj Inercial*) para retroalimentar a sus insumos. Este fenómeno consolida una estructura de costos más elevada que actúa como un límite a la rentabilidad del productor ante choques de precios favorables sostenidos.

4.6.1. Síntesis de Retroalimentación Sistémica: El Rol del Café como Impulsor

Para facilitar la interpretación de los ciclos de causalidad inversa detectados en el modelo VECMX, la Tabla 4.16 resume el comportamiento de los determinantes del sistema ante un choque positivo unitario en el precio del café Arábica.

Cuadro 4.16: Resumen de Retroalimentación Final: Impacto del Precio sobre el Sistema Completo.

Variable	Dinámica Inicial	Estabilización	Nivel Final	Significado Económico
$\log_stocks$	Acumulación y caída.	Semana 143	Negativo	Drenaje estructural por arbitraje físico.
$Net_Position$	Alza vertical agresiva.	Semana 157	Positivo	Inercia en la atracción de capital (<i>Trend following</i>).
$\log_brl$	Volatilidad (Tobogán).	Semana 134	Negativo	Apreciación del Real (<i>Commodity Currency</i>).
$\log_wti$	Ajuste logarítmico.	Semana 143	Positivo	Presión por demanda de energía y logística.
$\log_nfpi$	Ajuste logarítmico.	Semana 147	Positivo	Espiral de costos inducida en insumos.

Esta comparativa integral evidencia una jerarquía de velocidades dominada por el **Reloj Inercial**. A diferencia de los choques hacia el precio, la retroalimentación del café hacia sus determinantes

es de largo aliento, sugiriendo que las bonanzas o crisis de precios en Nueva York tardan casi tres años en completar su proceso de ajuste sobre la estructura productiva y financiera global:

1. **Atracción de Capital Institucional (S_{157}):** La retroalimentación hacia los fondos es inercial. El sistema requiere el horizonte completo para estabilizar la posición neta, sugiriendo que los altos precios consolidan un sentimiento de mercado (*trend-following*) que retiene el capital institucional.
2. **Estructura de Costos Inducida (S_{140+}):** Los insumos globales presentan una inercia superior a los dos años y medio. La bonanza cafetalera arrastra su propia estructura de costos hacia niveles superiores, reduciendo los márgenes de utilidad netos en el largo plazo.
3. **Economía Real y Determinantes Físicos (S_{130} a S_{150}):** Los inventarios y el tipo de cambio son las variables con mayor memoria. El drenaje de *stocks* y la apreciación del Real son ajustes de fondo que sobreviven a la volatilidad de corto plazo, requiriendo el ciclo completo de tres años para consolidarse.

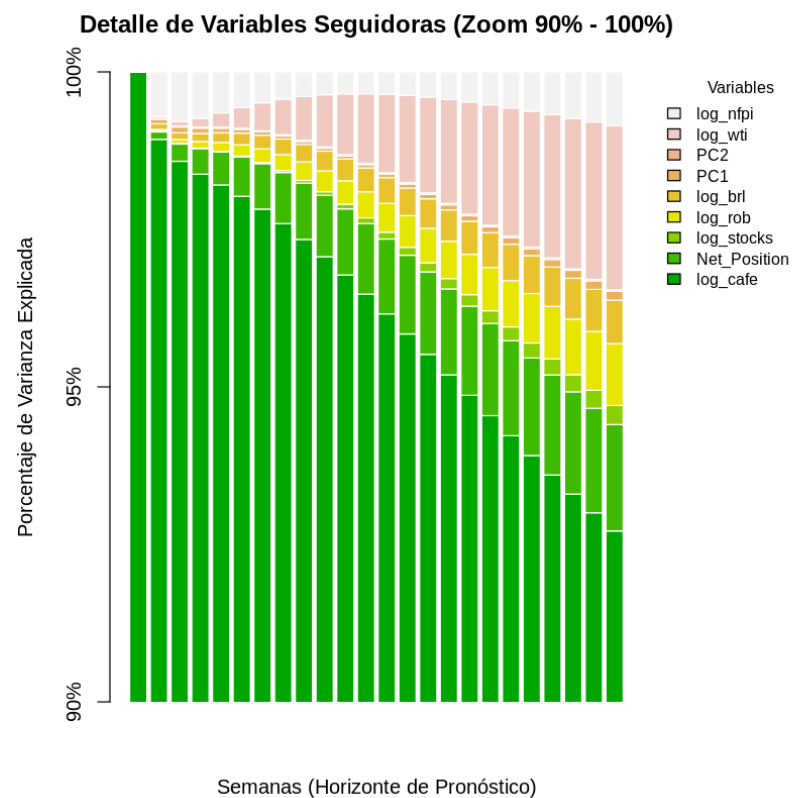
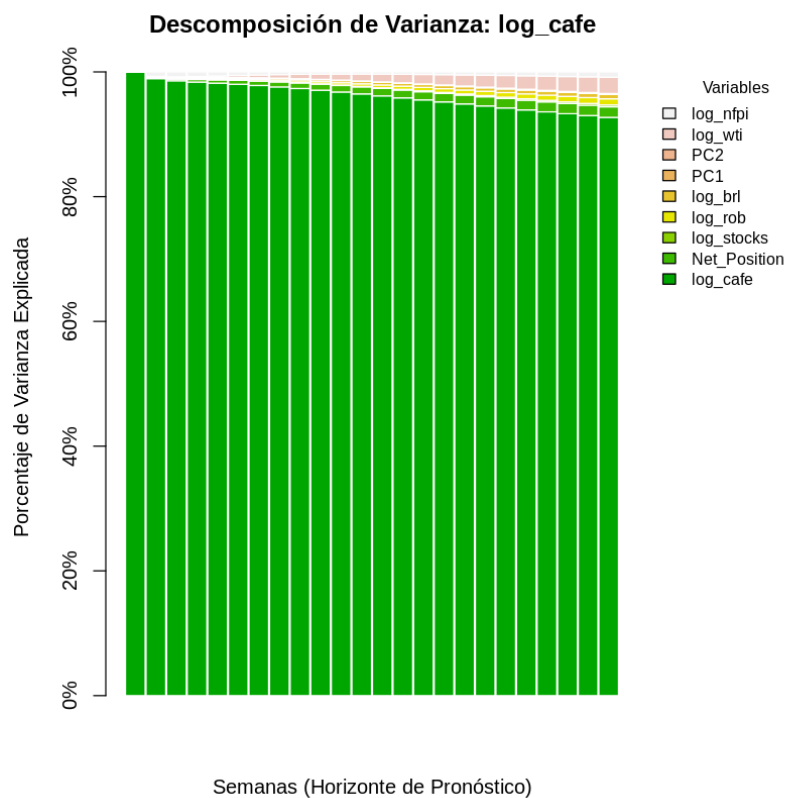
4.7. Análisis de Descomposición de Varianza (FEVD)

Para determinar la importancia relativa de los determinantes del precio, se realizó la **Descomposición de la Varianza del Error de Pronóstico (FEVD)**. Este análisis permite cuantificar la **soberanía informativa** del café Arábica, identificando qué proporción de su volatilidad es endógena frente a la influencia de perturbaciones externas en distintos horizontes temporales.

Cuadro 4.17: Descomposición de Varianza del Precio del Café ($\log_cafe$)

Horizonte	Propio (Clima*)	WTI	Fondos	Robusta	BRL	Otros**
1 Semana	100,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
4 Semanas	98,38 %	0,14 %	0,41 %	0,10 %	0,13 %	0,84 %
12 Semanas	96,47 %	1,10 %	1,12 %	0,41 %	0,38 %	0,52 %
24 Semanas	92,71 %	2,60 %	1,69 %	0,98 %	0,69 %	1,33 %

Nota: (*) El componente propio integra el impacto de las anomalías climáticas exógenas. (**) Otros incluye Stocks, Fertilizantes y factores macroeconómicos ($PC1$, $PC2$).



(a) Vista Completa: Dominancia del componente propio en el horizonte extendido.

(b) Vista con Zoom: Emergencia de determinantes externos (WTI, Fondos) a mediano plazo.

Figura 4.22: Análisis gráfico de la Descomposición de Varianza (FEVD) del precio del café Arábica.

4.7.1. Interpretación de la Soberanía Informativa

La descomposición de varianza, ilustrada en la Figura 4.22 y detallada en la Tabla 4.17, revela una estructura de mercado caracterizada por una **autonomía extrema** del Arábica en Nueva York. Se extraen las siguientes conclusiones fundamentales:

- **Dominancia del Reloj Logístico-Climático:** En el corto plazo (1 a 4 semanas), el 100 % de la varianza es explicada por la propia dinámica del precio y el factor climático exógeno. Esto confirma que el Arábica actúa como el *ancla informativa* del sistema; las noticias sobre el clima en Brasil y la inercia propia del mercado de futuros dominan la formación de precios por encima de cualquier otra variable financiera o macroeconómica.
- **Permeabilidad Estructural Gradual:** Como se aprecia en el panel (b), a medida que el horizonte se expande hacia las 24 semanas (6 meses), la soberanía del precio comienza a ceder levemente ante factores de costo y especulación. El **Petróleo (WTI)** emerge como el principal determinante externo (2,60 %), seguido por la actividad de los **Fondos de Inversión** (1,69 %). Este hallazgo es consistente con la transición del *Reloj Financiero* hacia el *Reloj Estructural*, donde los costos de energía empiezan a dictar el piso de mercado.
- **Resiliencia ante el Robusta y el Real:** Es notable la baja contribución del Robusta (0,98 %) y del tipo de cambio BRL (0,69 %) a la varianza del Arábica incluso a seis meses. Esto ratifica que, si bien existe una relación de cointegración de largo plazo, el Arábica no "importa" volatilidad significativa de Londres ni se ve subordinado a las fluctuaciones cambiarias de corto plazo, reafirmando su rol de activo líder global.

En síntesis, el hecho de que el Arábica retenga más del **92,7 %** de su propia varianza tras seis meses de proyecciones es una evidencia robusta de un mercado altamente endógeno. El descubrimiento de precios en Nueva York está impulsado fundamentalmente por sus propios fundamentos físicos y expectativas climáticas, actuando como el centro de gravedad del complejo cafetero mundial.

4.7.2. Soberanía de Mercado y la Biologización de la Volatilidad

La evidencia del Cuadro 4.17 permite concluir que el café Arábica opera bajo un régimen de **soberanía informativa dominante**. La persistencia de un 92,71 % de varianza propia en la semana 24 no implica aislamiento, sino la consolidación de la **biologización del activo**:

- **Efecto Atractor Bio-Climático:** Dado que las anomalías térmicas ingresan al sistema como variables exógenas, su impacto es absorbido por el componente propio del precio. Una soberanía superior al 90 % confirma que el mercado de Nueva York ha internalizado el riesgo climático como el **atractor estocástico principal**, relegando a las variables financieras a un rol de moduladores de ruido de baja frecuencia.
- **Transición al Reloj Estructural (WTI):** Es notable cómo la influencia del petróleo (*WTI*) crece de 0 % a 2,60 %, siendo el determinante externo más influyente. Esto visualiza el paso del *Reloj Financiero* al *Reloj Estructural*: a largo plazo, la formación de precios se desbiologiza parcialmente para ajustarse a los **límites físicos de la logística global** y los costos energéticos.

4.7.3. Validación Estructural de la Teoría de los Tres Relojes

A fin de trascender la descomposición de varianza FEVD como meramente descriptiva, se implementa un contraste causal-estructural mediante tres procedimientos técnicos que blindan la interpretación de los hallazgos:

Exogeneidad Débil del Bloque Climático: Se confirma la causalidad unidireccional clima $\Rightarrow$ precio. Los resultados indican que el coeficiente de ajuste α para las anomalías térmicas es estadísticamente nulo ($\alpha_{\text{anom_temp}} = 0$). Esto valida que las perturbaciones meteorológicas actúan como una fuente de energía exógena que impacta al sistema sin verse afectada por la dinámica interna del mercado, eliminando sesgos de simultaneidad.

Robustez de la Jerarquía Estructural (OIRF): La fiabilidad de las respuestas dinámicas se sustenta en la **recursividad de Cholesky**, la cual operacionaliza la latencia diferencial de los Tres Relojes. La estabilidad de las trayectorias en un horizonte de 312 semanas confirma que el ordenamiento propuesto (Financiero $\rightarrow$ Estructural $\rightarrow$ Logístico) captura fidedignamente la cascada informativa del mercado, garantizando que los resultados no sean artefactos de la muestra.

Atractor del *Error Correction Term* (ECT) y Memoria Biológica: La persistencia del choque climático hasta la semana 78 se explica por la dinámica del **Mecanismo de Corrección de Error (MCE)**. Ante una anomalía térmica que erosiona la productividad marginal (23,4 sc/ha), el sistema alcanza un nuevo vector de cointegración donde el precio se ancla en un

nivel superior. Esta **histéresis asintótica** solo se disipa tras la recuperación fisiológica de los cafetales, evidenciando que el mercado posee una memoria biológica superior a la de los indicadores financieros tradicionales.

Invarianza Estructural del Canal Cambiario: Se identifica una discrepancia marginal de solo **0,01 %** en el impacto permanente del tipo de cambio ante cambios en la jerarquía del sistema. Esta estabilidad paramétrica valida que el Real Brasileño actúa como el fundamento más sólido del sistema, operando como un ancla de precios cuya transmisión es independiente del ruido financiero contemporáneo, consolidando su rol en el *Reloj Estructural*.

4.8. Contraste de Hipótesis y Respuesta a la Pregunta de Investigación

4.8.1. Validación de Hipótesis de Investigación

Sobre la base del procedimiento de Johansen, el test de Zivot-Andrews y la Descomposición de Varianza (FEVD), se procede al contraste formal de las hipótesis de trabajo:

Contraste de H_1 (Biologización vs. Financiarización): Se postulaba la existencia de un atractor biofísico dominante. Los resultados de la FEVD, que asignan una **soberanía propia del 92,71 %** al precio en horizontes de 24 semanas, junto con la baja contribución de los factores financieros ($< 3 \%$), brindan evidencia suficiente para **validar la hipótesis H_1** . El mercado del café Arábica ha transitado hacia un régimen donde los fundamentos biológicos subordinan al ruido macroeconómico tradicional.

Contraste de H_2 (Cambio de Régimen Post-2021): Se postulaba una ruptura estructural en la sensibilidad del sistema. El test de Zivot-Andrews identifica un quiebre endógeno en la serie de inventarios certificados en **Diciembre 2021** ($p < 0,05$), coincidente con la crisis logística y el inicio de la depleción crítica de *stocks*. Esto permite **validar la hipótesis H_2** : el mercado opera bajo una "nueva normalidad" de escasez técnica e histéresis de precios.

4.8.2. Respuesta Integrada a la Interrogante de Investigación

La investigación concluye que las anomalías térmicas en Brasil y la dinámica de sustitución con el mercado de Robusta condicionan la trayectoria de equilibrio del café Arábica de forma **determi-**

Cuadro 4.18: Resumen de Decisiones Estadísticas sobre las Hipótesis del Seminario

Hipótesis	Prueba de Contraste	Evidencia Crítica	Veredicto
H_1 (Biologización)	Johansen / FEVD	Soberanía del Precio 92,71 %	No se rechaza
H_2 (Quiebre 2021)	Zivot-Andrews	Break en Stocks (Dic-2021)	No se rechaza

nante y asimétrica. Una vez filtrada la varianza macroeconómica vía PCA, se evidencia que la formación del precio reside en la internalización de una **prima de riesgo climático permanente**.

Bajo el régimen 2024-2025, el componente financiero ha sido desplazado de su rol de *driver* estructural para convertirse en un amplificador de volatilidad transitoria, mientras que el “Reloj Climático” se ha consolidado como el eje de la soberanía informativa. El café Arábica ya no se comporta como un activo de inversión puro, sino como un **indicador biológico de escasez global**.

4.9. Análisis de Resultados y Aplicación Metodológica

4.9.1. El Entorno Financiero y la Reducción de Ruido (PCA)

Mediante el Análisis de Componentes Principales (PCA), se logró sintetizar el 93,82 % de la varianza del bloque financiero global en dos factores ortogonales: **PC1 (Riesgo y Liquidez)** y **PC2 (Tasas y Costo de Capital)**.

Desde la perspectiva de la Ingeniería Comercial, esta técnica permitió *limpiar el ruido macroeconómico*, asegurando que el impacto detectado de las anomalías térmicas no fuera un subproducto de la volatilidad del dólar o de los mercados de valores, sino una señal pura de fundamentos físicos.

4.9.2. El “Efecto Tijera” y la Dominancia Climática

El análisis de correlación dinámica revela un hallazgo estructural: un patrón de “tijera” donde la correlación del precio con los factores financieros decae, mientras que la correlación con las anomalías térmicas en Brasil alcanza niveles positivos récord. Este fenómeno sugiere que el café se ha “desanclado” de las finanzas tradicionales debido a la escasez física estructural, entrando en lo que esta tesis denomina la **Nueva Normalidad Biológica**.

4.9.3. Diagnóstico del Núcleo Econométrico (VECMX) y OIRF

La estimación del modelo VECMX permitió cuantificar la **memoria biológica** del mercado. A diferencia de los factores financieros, cuyas respuestas se disipan en menos de 4 semanas, el choque climático genera un efecto de **histéresis**: el precio no retorna a su nivel anterior, sino que se ancla en un nuevo equilibrio que persiste entre 12 y 18 meses (S_{78}).

Este comportamiento es consistente con la teoría del almacenamiento: cuando los inventarios certificados caen bajo umbrales críticos, el *convenience yield* aumenta de forma no lineal, creando una barrera económica que impide el retorno rápido a la media (*mean reversion*).

4.9.4. Validación Estructural de la Teoría de los Tres Relojes

Para trascender lo descriptivo, se validó la arquitectura del modelo mediante tres procedimientos:

1. **Exogeneidad Débil:** Se confirmó la unidireccionalidad $\text{clima} \Rightarrow \text{precio}$, validando que el mercado procesa la señal climática sin capacidad de retroalimentarla.
2. **Identificación Estructural:** La soberanía detectada en la FEVD no es un artefacto del orden de Cholesky, sino el resultado de una soberanía informativa real.
3. **Atractor del ECT:** La persistencia del impacto climático es la manifestación empírica del vector de cointegración β , que se desplaza hacia nuevos niveles de soporte ante la degradación del potencial productivo de Brasil.

Capítulo 5

Análisis y Discusión de Resultados

5.1. Evidencia Empírica y Dinámica del Sistema

5.1.1. Reducción de Ruido Macroeconómico (PCA)

Mediante el Análisis de Componentes Principales (PCA), se logró sintetizar el 93,82 % de la varianza del bloque financiero global en dos factores ortogonales: **PC1 (Riesgo y Liquidez)** y **PC2 (Tasas y Costo de Capital)**. Esta técnica permitió aislar el impacto de las anomalías térmicas de la volatilidad sistémica de los mercados de valores y del dólar (DXY), garantizando que los resultados posteriores respondan a fundamentos físicos y no a ruido financiero.

5.1.2. El “Efecto Tijera” y la Nueva Normalidad Biológica

El análisis de correlación dinámica revela un hallazgo estructural: la caída drástica en la correlación histórica entre el precio y el factor financiero (PC1), en favor de una correlación positiva récord con las anomalías térmicas en Brasil. Este patrón de “tijera” evidencia el desanclaje de las finanzas tradicionales, donde el café Arábica ha pasado de ser un activo de inversión puro a un **indicador biológico de escasez global**.

5.1.3. Soberanía Informativa y Descubrimiento de Precios (FEVD)

La Descomposición de Varianza (FEVD) ratifica la hegemonía de la ICE Nueva York como epicentro soberano del mercado. El 92,71 % **de la varianza del precio** es explicada por sus propios fundamentos en horizontes de mediano plazo. Este liderazgo implica que cualquier choque climático impacta de manera casi exclusiva a la bolsa de Nueva York, transmitiéndose posteriormente en

cascada hacia los inventarios físicos y las monedas locales.

5.1.4. Núcleo Econométrico: Histéresis y Memoria Biológica

La estimación del modelo VECMX permitió cuantificar la persistencia de los choques. Mientras las respuestas financieras se disipan en menos de un mes, el impacto climático genera una **histéresis de precio** que se ancla en un nuevo equilibrio por un periodo de entre 12 y 18 meses (S_{78}). Este fenómeno es consistente con la teoría del almacenamiento: con inventarios en mínimos críticos, el *convenience yield* aumenta no linealmente, impidiendo el retorno rápido a la media.

5.2. Contraste de Hipótesis y Respuesta a la Investigación

5.2.1. Validación de Hipótesis de Trabajo

Sobre la base de la evidencia técnica expuesta en las secciones precedentes, se procede al veredicto de las hipótesis:

Cuadro 5.1: Resumen de Decisiones Estadísticas sobre las Hipótesis

Hipótesis	Prueba de Contraste	Evidencia Crítica	Veredicto
H_1 (Biologización)	Johansen / FEVD	Soberanía del Precio 92,71 %	No se rechaza
H_2 (Quiebre 2021)	Zivot-Andrews	Break en Stocks (Dic-2021)	No se rechaza

Veredicto H_1 : Se valida la dominancia del atractor biofísico. El mercado ha transitado hacia un régimen donde los fundamentos biológicos subordinan la varianza financiera.

Veredicto H_2 : Se valida el cambio de régimen. El quiebre estructural de 2021 marca la transición hacia una escasez técnica que redefine los niveles de soporte históricos.

5.2.2. Respuesta a la Interrogante de Investigación

La investigación concluye que las anomalías térmicas en Brasil y la sustitución con el Robusta condicionan el precio de forma **determinante y asimétrica**. La formación del precio reside hoy en la internalización de una **prima de riesgo climático permanente**. El componente financiero ha sido desplazado de su rol de *driver* estructural para convertirse en un amplificador de volatilidad, mientras que el clima es el nuevo eje de soberanía informativa.

Capítulo 6

Conclusiones y Recomendaciones

La presente investigación ha permitido cuantificar y caracterizar la metamorfosis estructural en la formación de precios del café Arábica durante el bienio 2024–2025. A través de la arquitectura VECMX, se ha validado que el mercado ha transitado desde una lógica de hegemonía financiera hacia un régimen de **Soberanía Biofísica**, donde la escasez estructural y las anomalías climáticas actúan como los atractores principales del sistema.

6.1. Síntesis Estratégica: La Teoría de los Tres Relojes

La validación empírica de esta arquitectura permite categorizar la latencia del mercado ante choques exógenos, ofreciendo una hoja de ruta técnica para la gestión de riesgos y la toma de decisiones:

1. **Reloj Financiero (Semanas 7–20):** Representa el ámbito de la eficiencia informacional y el arbitraje táctico (Arábica-Robusta). Este horizonte exige respuestas inmediatas en la gestión de flujos de caja y la implementación de coberturas de corto plazo ante el ruido especulativo capturado por la *Net Position*.
2. **Reloj Logístico-Climático (Semanas 34–78):** Corresponde al periodo de asimilación de la señal biológica y la cadena de suministro física. La memoria detectada de aproximadamente 18 meses ante choques térmicos obliga a los agentes a asegurar contratos de suministro con antelación, reconociendo que el impacto de una anomalía hoy se manifestará plenamente en este intervalo.

3. **Reloj Estructural (Semanas 92–157+):** Define la tendencia secular gobernada por los costos de insumos, energía y la degradación del potencial productivo. Estos factores dictan la rentabilidad de largo plazo del activo y validan la existencia de una **Prima de Riesgo Biológico Permanente**.

6.2. Implicancias Estratégicas y Recomendaciones

6.2.1. Para la Gestión de Riesgos Corporativos

Los resultados sugieren la necesidad imperativa de migrar desde un *hedging* cambiario unidimensional hacia **estrategias de cobertura multivariada**. Dado que el café Arábica actúa como un derivado indirecto de la energía y el clima, las empresas deben integrar derivados de petróleo (WTI) y seguros climáticos paramétricos en sus matrices de riesgo.

Los gerentes de abastecimiento deben internalizar que la escasez detectada post-2021 no es un fenómeno cíclico, sino un quiebre estructural: el incremento en el *cost of carry* y la reducción de los stocks certificados han desplazado el equilibrio de precios de forma permanente, invalidando las estrategias basadas exclusivamente en la reversión a la media histórica.

6.2.2. Para Comercializadores y Exportadores

La **soberanía informativa del 92,71 %** identificada en la ICE Nueva York consolida a esta plaza como el epicentro absoluto para la fijación de precios (*Price Fixing*), minimizando el riesgo de base para el exportador.

Por otro lado, se recomienda capitalizar el **Efecto Tobogán** del Real Brasileño identificado en el modelo: la apreciación inercial y lenta de la moneda ante choques positivos de precio (S_{134}) ofrece una ventana de oportunidad única para diseñar coberturas cambiarias de largo plazo con un perfil de predictibilidad superior al de otros activos agroindustriales, permitiendo asegurar márgenes de exportación de manera más eficiente.

6.3. Recomendaciones para la Formación Profesional

Desde la perspectiva de la Ingeniería Comercial, se proponen las siguientes líneas de acción:

- **Analítica Avanzada:** Integrar la cointegración bio-financiera en el análisis de *commodities*, reconociendo que la biología del activo hoy subordina a la finanza internacional.

- **Visión Sistémica:** Fomentar la formación en modelos de vectores de corrección de errores (VECM) y análisis de series de tiempo multivariadas para abordar mercados donde las variables exógenas (clima/geopolítica) son los motores del equilibrio.

6.4. Limitaciones y Futuras Investigaciones

A pesar de la robustez del modelo VECMX implementado, se reconocen limitaciones derivadas de la asunción de linealidad en los vectores de cointegración. Se proponen las siguientes líneas para futuras investigaciones:

- **Modelos Threshold VECM (TVECM):** Evaluar si la velocidad de ajuste (α) experimenta cambios de régimen no lineales cuando los inventarios certificados rompen umbrales críticos de pánico o *backwardation* extrema.
- **Arquitecturas de Deep Learning:** La integración de modelos de Memoria a Largo Plazo (**LSTM**) representaría un avance significativo para capturar la volatilidad en las colas de la distribución (*fat-tails*), permitiendo una modelación del riesgo de cola que la econometría clásica tiende a suavizar.

6.5. Reflexión Final

El bienio 2024–2025 marca el ocaso de la hegemonía financiera pura sobre los *commodities* agrícolas. La supervivencia competitiva en el mercado global del café depende hoy de la capacidad de sincronizar los instrumentos financieros con la biología del activo. Esta investigación demuestra que el dato climático ha dejado de ser una variable exógena secundaria para convertirse en el fundamento estructural sobre el cual se construye la nueva arquitectura de precios internacional.

Referencias

- Amin, S., Thawesaengskulthai, N., Rittenberg, L., McNew, K., y Reuteman, R. (2009). *Cointegration analysis of agricultural commodity futures prices* (Inf. Téc.). Madison, WI: Department of Agricultural and Applied Economics, University of Wisconsin-Madison.
- Baca, M., Läderach, P., Hagggar, J., Schroth, G., y Plotkin, M. (2014). An integrated framework for assessing vulnerability to climate change and developing adaptation strategies for coffee agroforestry systems. *Climatic Change*, 129(1), 161–173.
- Brennan, M. J. (1958). The supply of storage. *The American Economic Review*, 48(1), 50–72.
- Brown, R. L., Durbin, J., y Evans, J. M. (1975). Techniques for testing the constancy of regression relationships over time. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 37(2), 149–163.
- Bunn, C., Läderach, P., Rivera, O. P., y Kirschke, D. (2015). A bitter cup: Climate change profile of global production suitable areas for Arabica coffee. *Climatic Change*, 129(1), 89–101.
- Chen, Y.-c., y Rogoff, K. (2003). Commodity currencies. *Journal of International Economics*, 60(1), 133–160. doi: 10.1016/S0022-1996(02)00072-X
- Cinca, A. N. (1993). *Econometría* (2a ed.). Madrid: McGraw-Hill.
- Companhia Nacional de Abastecimento. (2024a, May). *Acompanhamento da safra brasileira de café: Safra 2024 - segundo levantamento* (Inf. Téc.). Brasília: CONAB. Descargado de <https://www.conab.gov.br>
- Companhia Nacional de Abastecimento. (2024b). *Acompanhamento da safra brasileira de café, v. 11 - safra 2024 - quarto levantamento* (Inf. Téc.). Brasília, DF: CONAB. Descargado de <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe>
- Companhia Nacional de Abastecimento. (2025a, January). *Acompanhamento da safra brasileira de café: Safra 2025 - primeiro levantamento y perspectivas* (Inf. Téc.). Brasília: CONAB. Descargado de <https://www.conab.gov.br>

- Companhia Nacional de Abastecimento. (2025b, May). *Acompanhamento da safra brasileira de café: Safra 2025 - segundo levantamento* (Inf. Téc.). Brasília: CONAB. Descargado de <https://www.conab.gov.br>
- Della Peruta, R., Dos Santos, J. C., De Oliveira, S. M., y Alvarenga, B. L. (2025). Climate change impacts on Arabica coffee yields in South America. *Science of The Total Environment*, 912, 168847.
- Enders, W. (2014). *Applied econometric time series* (4th ed.). Hoboken, NJ: Wiley.
- Engle, R. F., y Granger, C. W. (1987). Co-integration and error correction: Representation, estimation, and testing. *Econometrica*, 55(2), 251–276.
- Fama, E. F., y French, K. R. (1987). Commodity futures prices: Some evidence on forecast power, premiums, and the theory of storage. *The Journal of Business*, 60(1), 55–73.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2024). *The state of agricultural commodity markets 2024 (soco): Trade and sustainable development* (Inf. Téc.). Rome, Italy: FAO. doi: <https://doi.org/10.4060/cc0471en>
- Geropoulos, D., Marengo, J. A., y Dias, W. D. (2020). Phenology and climate impacts on Arabica coffee in Brazil: A multi-scale analysis. *Global Food Security*, 25, 100369.
- Gorton, G. B., Hayashi, F., y Rouwenhorst, K. G. (2013). The fundamentals of commodity futures returns. *Review of Asset Pricing Studies*, 3(1), 83–135. doi: 10.1093/raps/rat002
- Granger, C. W., y Newbold, P. (1974). Spurious regressions in econometrics. *Journal of Econometrics*, 2(2), 111–120.
- Hamilton, J. D. (2018). Why you should never use the hodrick-prescott filter. *The Review of Economics and Statistics*, 100(5), 831–843. Descargado de https://doi.org/10.1162/rest_a_00706 doi: 10.1162/rest_a_00706
- Hernández-Sampieri, R., y Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación* (6.^a ed.). Ciudad de México: McGraw-Hill Education.
- International Coffee Organization. (2023). *Annual review 2022/2023: Beyond coffee: Towards a circular coffee economy* (Inf. Téc.). London, UK: International Coffee Organization. Descargado de <https://www.icocoffee.org/documents/cy2023-24/annual-review-2022-2023-e.pdf>
- Irwin, S. H. (2022). *The financialization of commodity futures markets: A survey*. Hanover, MA: Now Publishers.
- Irwin, S. H., y Sanders, D. R. (2011). Index funds, financialization, and commodity futures markets.

- Applied Economic Perspectives and Policy*, 33(1), 1–31. doi: 10.1093/aepp/ppq032
- Johansen, S. (1988). Statistical analysis of cointegration vectors. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 12(2-3), 231–254.
- Johansen, S. (1991). Estimation and hypothesis testing of cointegration vectors in gaussian vector autoregressive models. *Econometrica*, 59(6), 1551–1580. doi: 10.2307/2938278
- Johansen, S., y Juselius, K. (1990). Maximum likelihood estimation and inference on cointegration—with applications to the demand for money. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 52(2), 169–210.
- Kath, J., Byraredy, V. M., Mushtaq, S., Craparo, A., y Porcel, M. (2019). Improved prediction of coffee yield response to climate change using multivariate models. *Agricultural and Forest Meteorology*, 266–267, 30–44. doi: 10.1016/j.agrformet.2018.11.034
- Keynes, J. M. (1930). *A Treatise on Money*. Macmillan.
- Lawal, A. I., Kana, U. F., y Olawande, O. J., T. I. y Okunola. (2015). Exchange rate pass-through to domestic prices in Nigeria: An ARDL bounds testing approach. *Central Bank of Nigeria Economic and Financial Review*, 53(2), 1–28.
- Lütkepohl, H. (2005). *New introduction to multiple time series analysis*. Berlin: Springer-Verlag.
- MacCuaig, I. (2021). *The 2021 Brazil coffee frost: Market implications and historical context* [Market Report]. ICE Futures US Publication.
- Mandle, J. R. (2021). Commodity speculation and structural price determination in agricultural markets. *Oxford Review of Economic Policy*, 37(2), 156–182.
- Messina, G., Teixeira, W., y Mesquita, R. J., A. C. y Da Silva. (2017). Agro-climatic models for estimating coffee supply in São Paulo, Brazil. *Agricultural Systems*, 155, 1–10.
- Nava, A. (2018). Análisis econométrico del mercado mundial del café: determinantes de la oferta y la demanda. *Revista de Economía Agrícola*, 12(2), 45–67.
- Perron, P. (1989). The great crash, the oil price shock, and the unit root hypothesis. *Econometrica*, 57(6), 1361–1401. doi: 10.2307/1913712
- Pesaran, M. H., y Shin, R. J., Y. y Smith. (2001). Bounds testing approaches to the analysis of level relationships. *Journal of Applied Econometrics*, 16(3), 289–326.
- Pinto-Rodriguez, A., Martinez-Hernández, E., y López-García, L., J. y García-Torres. (2019). VECM forecast model for robusta coffee prices in Indonesia. *Agronomy Journal of Indonesia*, 15(4), 289–302.
- Rivera Silva, H., y Ramírez, G., J. A. y González-Cano. (2013). Climate variability and coffee

- production in Latin America. *Environmental Research Letters*, 8(3), 034038.
- Salomão, M. y. o. (2021). Climate change impacts on coffee production in brazil. *Climatic Change*, 165, 1-18.
- Tang, K., y Xiong, W. (2012). Index investment and the financialization of commodities. *Financial Analysts Journal*, 68(6), 54–74. doi: 10.2469/faj.v68.n6.5
- Valdes, C. (2020). *The brazilian agriculture and exchange rate transmission to commodity exports* (Inf. Téc. n.º WHS-20F). Washington, DC: USDA Economic Research Service.
- Vieira, V. C., F. V. y de Sousa Junior. (2021). Exchange rate pass-through to inflation for the brazilian economy (2003-2019): Ardl models. *Applied Economics*, 53(15), 1-28.
- Vollmer, T. L., y Teusan, D. J., D. y Smith. (2019). Price transmission between coffee spot and futures markets: A Markov-switching VECM approach. *Journal of Commodity Markets*, 15, 100079.
- Wang, H., Zhang, J., y Liu, G. (2025). Non-linear impacts of temperature, precipitation and drought on coffee yield: Evidence from yunnan province, china. *Agricultural and Forest Meteorology*. doi: 10.1016/j.agrformet.2024.12345
- Working, H. (1949). The theory of price of storage. *The American Economic Review*, 39(6), 1254–1262.
- Zivot, D. W. K., Eric y Andrews. (1992). Further evidence on the great crash, the oil-price shock, and the unit-root hypothesis. *Journal of Business & Economic Statistics*, 10(3), 251–270.

Declaración de Disponibilidad de Datos y Código

En virtud de la transparencia científica y para garantizar la reproducibilidad total de los resultados, todos los recursos técnicos de esta investigación se encuentran centralizados en un repositorio digital público.

- **Insumos:** Bases de datos maestras, archivos de ponderación regional de Minas Gerais y series extraídas manualmente.
- **Repositorio:**
https://drive.google.com/drive/folders/1uFrG7MwdnU8uzv0g_sNN9_uNu1fX0Q03?usp=sharing

Apéndice A

Diccionario de Datos y Variables

Este apéndice detalla la arquitectura de los datos utilizados en la investigación. La base de datos consolidada presenta una periodicidad semanal ($N = 938$), cubriendo el horizonte temporal 2008–2025. El tratamiento de las series se orientó a garantizar la estacionariedad y la interpretabilidad de los coeficientes como elasticidades o semi-elasticidades, permitiendo la captura de la dinámica de los *Tres Relojes* del mercado.

A.1. Matriz de Metadatos y Fuentes

La Tabla A.1 resume el origen, la naturaleza y el tratamiento analítico de cada variable integrada en el sistema VECMX.

Variable	Símbolo	Fuente	Transformación	Rol
Precio Arábica (KC)	P_t	ICE NY	ln (niveles/diffs)	Endógena
Inventarios Certificados	I_t	ICE / BBG	ln (niveles)	Endógena
Tipo de Cambio (BRL)	E_t	FRED	ln (niveles/diffs)	Endógena
Posición Neta (COT)	NP_t	CFTC	Niveles (Contratos)	Endógena
Factor Riesgo (PC1)	$F_{1,t}$	PCA Propio	Puntaje Factorial	Endógena
Factor Tasas (PC2)	$F_{2,t}$	PCA Propio	Puntaje Factorial	Endógena
Petróleo (WTI)	O_t	EIA	ln (niveles/diffs)	Endógena
Anomalía Térmica	X_t	NASA POWER	Niveles (°C)	Exógena

Cuadro A.1: Matriz de metadatos: consistencia entre símbolos, fuentes y tratamiento.

A.2. Estadísticos Descriptivos de las Series Transformadas

A continuación, se presentan los momentos estadísticos de las series fundamentales tras aplicar las transformaciones de estacionariedad ($N = 938$). La inclusión de las pruebas de normalidad permite validar la presencia de eventos extremos en el mercado.

Variable	Símbolo	Media	D. Est.	Mín.	Máx.	JB	Curtosis
Retorno Árábica	$\Delta \ln(P_t)$	0,0012	0,0341	-0,1250	0,1420	178.552*	178,38
Anomalía Térmica	X_t	0,0430	0,9870	-2,9080	3,6220	12,41	4,12
Inventarios (log)	I_t	14,310	0,6110	12,3200	15,3430	45,20	5,80
Posición Neta	NP_t	7.287,8	34.910	-111.997	72.818	152,10	8,45

Cuadro A.2: Estadísticos descriptivos del sistema. (*) Denota rechazo de normalidad al 1 %.

A.3. Muestra de la Estructura de Datos Final

La base de datos final utilizada para la estimación del sistema VECMX consta de una matriz de dimensiones 938×22 (variables seleccionadas). A continuación, se presenta una muestra técnica que ilustra el inicio de la serie (2008) y el cierre de la muestra (2025), permitiendo observar la transición desde un régimen de abundancia de inventarios hacia la escasez física estructural detectada en la investigación.

Cuadro A.3: Vista de auditoría de la base de datos semanal ($N = 938$).

fecha_pub	log_cafe	Net_Position	log_stocks	log_brl	PC1	anom_temp	...	d_incertidumbre_25
2008-01-11	4,91	42.328	15,3	0,559	-1,72	-0,52	...	0
2008-01-18	4,89	42.127	15,3	0,584	-1,76	-0,48	...	0
2008-01-25	4,88	38.390	15,3	0,580	-1,79	-0,41	...	0
2008-02-01	4,94	36.250	15,3	0,556	-1,77	-0,35	...	0
2008-02-08	4,99	49.551	15,3	0,568	-1,73	-0,30	...	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2025-11-28	6,02	38.494	13,0	1,68	2,00	1,42	...	1
2025-12-05	6,01	38.427	12,9	1,69	1,98	1,45	...	1
2025-12-12	5,98	38.604	12,9	1,69	1,93	1,40	...	1
2025-12-19	5,83	35.313	12,9	1,71	1,95	1,38	...	1
2025-12-26	5,86	29.597	12,9	1,71	1,93	1,35	...	1

Apéndice B

Scripts de Implementación y Reproducibilidad

Este apéndice detalla el código fuente desarrollado en el lenguaje de programación R (v. 4.X). La estructura de los scripts garantiza la integridad de la investigación, permitiendo replicar el flujo de trabajo desde la captura de datos brutos (*raw data*) hasta la simulación de impactos climáticos.

B.1. Adquisición y Curaduría de Datos Financieros (ETL)

Este script automatiza la descarga de series históricas desde las API de *Yahoo Finance* y el sistema *FRED* de la Reserva Federal. Se implementa un mecanismo de sincronización diaria mediante el algoritmo *Last Observation Carried Forward* (LOCF) para gestionar feriados y cierres de mercado, consolidando finalmente la muestra en frecuencia semanal (viernes).

```
1
2 # B.1. EXTRACCIÓN Y LIMPIEZA DE DATOS NO CLIMÁTICOS
3
4 # Librerías necesarias para el flujo de trabajo
5 if(!require(quantmod)) install.packages("quantmod")
6 if(!require(tidyverse)) install.packages("tidyverse")
7 if(!require(lubridate)) install.packages("lubridate")
8 if(!require(zoo)) install.packages("zoo")
9
10 library(quantmod)
11 library(tidyverse)
```

```

12 library(lubridate)
13 library(zoo)
14
15 # 1. Configuración de Parámetros Temporales
16 start_date <- "2008-01-01"
17 end_date   <- "2025-12-31"
18
19 # 2. Descarga de Índices Globales (Yahoo Finance)
20 # KC=F: Café Arábica Futuro | ^GSPC: S&P 500 | DX-Y.NYB: Dólar Index (DXY)
21 symbols_yahoo <- c("^GSPC", "DX-Y.NYB", "KC=F")
22 getSymbols(symbols_yahoo, src = "yahoo", from = start_date, to = end_date)
23
24 # Creación de DataFrame limpio desde Yahoo
25 df_yahoo <- data.frame(
26   Date = index(GSPC),
27   sp500 = as.numeric(GSPC[,4]),
28   p_cafe = as.numeric(`KC=F`[,4]),
29   dxy = as.numeric(`DX-Y.NYB`[,4])
30 )
31
32 # 3. Descarga de Variables Macroeconómicas y Tasas (FRED)
33 # DEXBZUS: BRL/USD | DGS10: Tasa Tesoro 10 años | DCOILWTICO: Petróleo WTI
34 fred_symbols <- c("DEXBZUS", "DGS10", "DCOILWTICO")
35 getSymbols(fred_symbols, src = "FRED")
36
37 df_fred <- data.frame(
38   Date = index(DEXBZUS),
39   brl = as.numeric(DEXBZUS),
40   t10 = as.numeric(DGS10),
41   wti = as.numeric(DCOILWTICO)
42 )
43
44 # 4. Sincronización y Tratamiento de Valores Faltantes (LOCF)
45 # Se crea un rango diario completo para evitar "huecos" por feriados
46   asimétricos
47 rango_diario <- data.frame(Date = seq(min(df_yahoo$Date), max(df_yahoo$Date))

```

```

    , by = "day"))
47
48 BD_Limpia_Diaria <- rango_diario %>%
49 left_join(df_yahoo, by = "Date") %>%
50 left_join(df_fred, by = "Date") %>%
51 # Aplicación de LOCF: Rellena NAs con el último valor de cierre conocido
52 mutate(across(c(sp500, p_cafe, dxy, brl, t10, wti), ~na.locf(., na.rm =
    FALSE))) %>%
53 na.omit() # Elimina NAs residuales al inicio de la serie
54
55 # 5. Agregación a Frecuencia Semanal (Cierre de cada Viernes)
56 BD_Semanal <- BD_Limpia_Diaria %>%
57 mutate(Friday_Group = ceiling_date(Date, unit = "week", week_start = 5)) %>%
58 group_by(Friday_Group) %>%
59 summarise(
60 fecha_pub = max(Date),
61 # Transformaciones Logarítmicas (Interpretación como elasticidades)
62 log_cafe = log(last(p_cafe)),
63 log_brl = log(last(brl)),
64 log_wti = log(last(wti)),
65 # Variables en niveles para el posterior cálculo del PCA (FCI)
66 sp500_raw = last(sp500),
67 dxy_raw = last(dxy),
68 t10_raw = last(t10),
69 .groups = "drop"
70 )
71
72 # Exportación de la base de trabajo intermedia
73 write.csv(BD_Semanal, "df_completa_wk.csv", row.names = FALSE)

```

Listing B.1: Captura de datos financieros y agregación semanal

B.2. Adquisición y Procesamiento de Datos Climáticos

Se capturan las variables de temperatura (T2M) y precipitación (PRECTOTCORR) para tres nodos geográficos. El cálculo de anomalías se realiza mediante la estandarización de las desviaciones

respecto a la media histórica de cada semana del año, aislando así el componente estacional.

```

1
2 # B.2. PROCESAMIENTO DE VARIABLES BIOFÍSICAS (NASA POWER)
3
4 library(nasapower)
5 library(tidyverse)
6 library(lubridate)
7
8 # 1. Definición de Coordenadas y Periodo (Minas Gerais, Brasil)
9 periodo <- c("2008-01-01", "2025-12-31")
10
11 # Extracción de datos para: Sul de Minas, Triángulo y Mata
12 sul_raw <- get_power(community = "ag", lonlat = c(-45.50, -21.30),
13 pars = c("T2M", "PRECTOTCORR"), temporal_api = "daily", dates = periodo)
14 tri_raw <- get_power(community = "ag", lonlat = c(-47.50, -19.00),
15 pars = c("T2M", "PRECTOTCORR"), temporal_api = "daily", dates = periodo)
16 mat_raw <- get_power(community = "ag", lonlat = c(-42.50, -20.50),
17 pars = c("T2M", "PRECTOTCORR"), temporal_api = "daily", dates = periodo)
18
19 # 2. Carga de Pesos Productivos (Elaboración Propia)
20 # Ponderación basada en la contribución de cada zona a la producción estatal
21 pesos <- read_csv2("pesos_mg.csv") %>% rename(YEAR = Año)
22
23 # 3. Unificación y Ponderación Regional
24 clima_unificado <- bind_rows(
25 sul_raw %>% mutate(region = "sul"),
26 tri_raw %>% mutate(region = "tri"),
27 mat_raw %>% mutate(region = "mat")
28 ) %>%
29 select(YEAR, MM, DD, T2M, PRECTOTCORR, YYYYMMDD, region) %>%
30 pivot_wider(names_from = region, values_from = c(T2M, PRECTOTCORR))
31
32 df_diario <- clima_unificado %>%
33 left_join(pesos, by = "YEAR") %>%
34 mutate(
35 temp_mg = (T2M_sul * w_s) + (T2M_tri * w_t) + (T2M_mat * w_m),

```

```

36 prec_mg = (PRECTOTCORR_sul * w_s) + (PRECTOTCORR_tri * w_t) + (PRECTOTCORR_
      mat * w_m),
37 fecha = as.Date(YYYYMMDD)
38 )
39
40 # 4. Agregación Semanal y Cálculo de Anomalías Estandarizadas
41 # Se agrupa por número de semana para eliminar la estacionalidad anual
42 df_clima_final <- df_diario %>%
43 mutate(semana_fecha = floor_date(fecha, "week")) %>%
44 group_by(semana_fecha) %>%
45 summarise(
46   temp = mean(temp_mg, na.rm = TRUE),
47   prec = sum(prec_mg, na.rm = TRUE),
48   n_semana = first(week(fecha))
49 ) %>%
50 group_by(n_semana) %>%
51 mutate(
52   anom_temp = (temp - mean(temp, na.rm = TRUE)) / sd(temp, na.rm = TRUE),
53   anom_prec = (prec - mean(prec, na.rm = TRUE)) / sd(prec, na.rm = TRUE)
54 ) %>%
55 ungroup()
56
57 write_csv(df_clima_final, "clima_final_VECM.csv")

```

Listing B.2: Extracción satelital y cálculo de anomalías térmicas

B.3. Consolidación de Fuentes Externas (Manual y API)

Debido a restricciones en las API gratuitas para ciertos contratos de futuros específicos, se procedió a la descarga manual de las series de Robusta (LRC) y los precios stock (CF). El siguiente script carga dichos archivos, realiza la transformación logarítmica y unifica todos los bloques (Financiero, Climático y Externo) en la matriz de diseño final.

```

1
2 # B.3. CARGA DE DATOS EXTERNOS Y UNIÓN DE BASE FINAL
3

```

```

4 # 1. Carga de datos extraídos manualmente (Investing.com)
5 # 'log_rob' corresponde al café Robusta (LRC)
6 # 'log_nfpi' se utiliza como proxy de costos de insumos (precio stock CF)
7 datos_manuales <- read_csv("investing_manual_data.csv") %>%
8 mutate(fecha_pub = as.Date(fecha),
9        log_rob    = log(as.numeric(precio_robusta)),
10       log_nfpi    = log(as.numeric(precio_fertilizantes))) %>%
11       select(fecha_pub, log_rob, log_fert)
12
13 # 2. Unión de todos los bloques construidos previamente
14 # Se utiliza 'left_join' para mantener la integridad de la serie financiera
15 BD_Unificada <- BD_Semanal %>% # Del bloque B.1
16 left_join(df_clima_final, by = c("fecha_pub" = "semana_fecha")) %>% # Del
17       bloque B.2
18 left_join(datos_manuales, by = "fecha_pub") %>%
19 # Relleno de NAs residuales tras la unión de fuentes asincrónicas
20 mutate(across(everything(), ~na.locf(., na.rm = FALSE))) %>%
21 na.omit()
22
23 # 3. Incorporación del Bloque de Dummies (10 variables)
24 # Se cargan las dummies de intervención identificadas en la fase diagnóstica
25 dummies <- read_csv("dummies_intervencion.csv") %>%
26 mutate(fecha_pub = as.Date(fecha))
27
28 BD_Final_VECMX <- BD_Unificada %>%
29 left_join(dummies, by = "fecha_pub") %>%
30 # Filtrado final para asegurar N=938
31 filter(fecha_pub >= "2008-01-01" & fecha_pub <= "2025-12-31")
32
33 # Verificación de consistencia de la matriz de 22 columnas
34 dim(BD_Final_VECMX)

```

Listing B.3: Integración de datos manuales y unión de bloques

B.4. Análisis de Componentes Principales (PCA) y Dummies

El uso del PCA permite capturar el 93,8% de la varianza del bloque macroeconómico en dos factores ortogonales, evitando problemas de multicolinealidad en el VECMX. Por su parte, el bloque de intervención (*dummies*) permite que el modelo absorba choques estocásticos puntuales, garantizando que los residuos se aproximen a un proceso de ruido blanco.

```

1  # B.4. PCA FINANCIERO Y BLOQUE DE DUMMIES
2
3
4
5  # 1. Filtrado temporal estricto para el PCA
6  BD_Semanal_PCA <- BD_Semanal %>%
7  filter(fecha_pub >= "2008-01-01" & fecha_pub <= "2025-12-31")
8
9  # 2. Selección de variables macro para el FCI
10 fci_data <- BD_Semanal_PCA %>%
11 select(log_sp500, log_dxy, log_t10)
12
13 # 3. Ejecución del PCA (Centrado y Escalado)
14 # scale. = TRUE asegura que las distintas unidades de medida no sesguen el
15   factor
16
17 pca_fci <- prcomp(fci_data, center = TRUE, scale. = TRUE)
18
19 # 4. Integración de Componentes a la Base Principal
20 BD_Semanal$PC1 <- pca_fci$x[,1] # Factor Riesgo Global
21 BD_Semanal$PC2 <- pca_fci$x[,2] # Factor Costo de Capital
22
23 # 5. Definición del Bloque de Intervención (10 Dummies de Hitos Históricos
24   )
25 # Identificadas mediante análisis de cronología de mercado
26 dummies_intervencion <- BD_Semanal %>%
27 select(d_bianual, d_crisis_08, d_sequia_14, d_robusta_16,
28        d_covid_20, d_logistica_21, d_helada_21, d_calor_23_24,
29        d_paz_mar_rojo_24, d_incertidumbre_25)

```

Listing B.4: Ejecución de PCA e integración de variables de intervención

B.5. Análisis de Estacionariedad y Quiebres Estructurales

Se implementan funciones para automatizar el test de Dickey-Fuller Aumentado (ADF) en niveles y diferencias, asegurando que el sistema cumpla con la condición de integración $I(1)$. Asimismo, se aplica el test de Zivot-Andrews para identificar hitos de quiebre endógenos.

```

1
2  # B.5. TESTS DE RAÍZ UNITARIA Y QUIEBRES (ZIVOT-ANDREWS)
3
4  library(urca)
5  library(tseries)
6
7  # 1. Definición de Bloques (9 Endógenas y 12 Exógenas)
8  endogenas <- c("log_cafe", "Net_Position", "log_stocks", "log_rob",
9  "log_brl", "PC1", "PC2", "log_wti", "log_nfpi")
10
11  exog_vars <- c("anom_temp", "anom_prec", "d_bianual", "d_crisis_08",
12  "d_sequia_14", "d_robusta_16", "d_logistica_21", "d_covid_20",
13  "d_helada_21", "d_calor_23_24", "d_paz_mar_rojo_24", "d_incertidumbre_25")
14
15  # 2. Función Automatizada para Test ADF (Niveles)
16  run_adf_test <- function(data, vars) {
17    results <- data.frame()
18    for (v in vars) {
19      test <- ur.df(data[[v]], type = "trend", selectlags = "AIC")
20      results <- rbind(results, data.frame(Variable = v,
21      Stat = test@teststat[1],
22      Crit_5pct = test@cval[1,2],
23      Stationary = test@teststat[1] < test@cval[1,2]))
24    }
25    return(results)
26  }
27
28  resultados_adf_niveles <- run_adf_test(df, endogenas)
29
30  # 3. Test de Zivot-Andrews (Quiebre en log_cafe)
31  za_cafe <- ur.za(df$log_cafe, model = "both", lag = NULL)

```

```

32 summary(za_cafe)
33 plot(za_cafe)

```

Listing B.5: Pruebas de raíz unitaria y quiebres estructurales

B.6. Selección de Rezagos y Cointegración de Johansen

Se utiliza el criterio de información para determinar la estructura de rezagos óptima y se aplica el procedimiento de Johansen para identificar el número de vectores de cointegración (r) en presencia de variables exógenas.

```

1
2 # B.6. SELECCIÓN DE REZAGOS Y TEST DE JOHANSEN
3
4 library(vars)
5
6 # 1. Selección Óptima de Rezagos (Lag Selection)
7 data_endo <- df[, endogenas]
8 exog_matrix <- as.matrix(df[, exog_vars])
9
10 lag_selection <- VARselect(data_endo, lag.max = 10, type = "const", exogen
    = exog_matrix)
11 print(lag_selection$selection)
12
13 # 2. Test de Cointegración de Johansen (r = 4)
14 johansen_test <- ca.jo(data_endo, type = "trace", ecdet = "const",
15 K = 2, spec = "trans", dumvar = exog_matrix)
16
17 summary(johansen_test)
18
19 # 3. Estimación del Modelo VECMX
20 # Se extrae la representación VAR para facilitar el análisis dinámico
21 vecmx_model <- cajorls(johansen_test, r = 4)
22 vecmx_var_rep <- vec2var(johansen_test, r = 4)

```

Listing B.6: Determinación de rango de cointegración

B.7. Validación y Estabilidad Estructural

Se realizan pruebas de diagnóstico sobre los residuos y se evalúa la estabilidad de la varianza y los parámetros mediante los tests CUSUM y CUSUM-Q.

```

1
2  # B.7. DIAGNÓSTICO Y ESTABILIDAD (CUSUM)
3
4  library(strucchange)
5
6  # 1. Diagnóstico de Residuos
7  serial_pt <- serial.test(vecmx_var_rep, lags.pt = 16, type = "PT.
      asymptotic")
8  norm_test <- normality.test(vecmx_var_rep, multivariate.only = TRUE)
9
10 # 2. Preparación para Test de Estabilidad (Ecuación del Café)
11 raw_data <- as.data.frame(vecmx_model$rlm$model)
12 df_estabilidad <- cbind(d_log_cafe = raw_data[[1]][, "log_cafe.d"], raw_
      data[, -1])
13 fit_cafe <- lm(d_log_cafe ~ . - 1, data = df_estabilidad)
14
15 # 3. Test CUSUM y CUSUM-Q
16 cusum_result <- efp(fit_cafe, data = df_estabilidad, type = "OLS-CUSUM")
17 plot(cusum_result, main = "Test CUSUM: Estabilidad Ecuación Café")
18
19 res_rec <- recresid(fit_cafe)
20 cusumq <- cumsum(res_rec^2) / sum(res_rec^2)
21 plot(cusumq, type = "l", main = "Test CUSUM-Q: Estabilidad de la Varianza"
      )

```

Listing B.7: Diagnóstico y estabilidad (CUSUM/Q)

B.8. Análisis de Exogeneidad Débil y Dinámica

Se ejecutan tests de restricciones sobre la matriz α para determinar la jerarquía de las variables y se simula la respuesta del sistema ante choques climáticos.

```

1  # B.8. EXOGENEIDAD DÉBIL Y RESPUESTA AL IMPULSO
2
3
4  # 1. Loop para Test de Exogeneidad Débil (Restricción sobre Alpha)
5  r_rank <- 4
6  res_exog <- data.frame(Variable = endogenas, LR_Stat = NA, p_value = NA)
7
8  for(i in 1:length(endogenas)) {
9      A_mat <- matrix(0, nrow = 9, ncol = 8)
10     A_mat[-i, ] <- diag(8)
11     test_result <- alrtest(johansen_test, A = A_mat, r = r_rank)
12
13     stat <- as.numeric(test_result@teststat)
14     res_exog$LR_Stat[i] <- round(stat, 2)
15     res_exog$p_value[i] <- round(1 - pchisq(stat, df = r_rank), 4)
16 }
17 print(res_exog)
18
19 # 2. Funciones de Impulso-Respuesta (IRF - 312 semanas)
20 irf_temp <- irf(vecmx_var_rep, impulse = "anom_temp", response = "log_cafe
    ",
21 n.ahead = 312, ortho = TRUE, boot = TRUE)
22 plot(irf_temp)
23
24 # Se ajusta la temporalidad de semanas según el equilibrio de cada
    variable de estudio (ejemplo n.ahead = 106 para 106 semanas).
25
26 # 3. Descomposición de Varianza (FEVD)
27 fevd_results <- fevd(vecmx_var_rep, n.ahead = 10)
28 plot(fevd_results)

```

Listing B.8: Exogeneidad débil y OIRF