

Sustitución de los Métodos Lineales por la Geometría de Probabilidad

*Cadenas de Montecarlo Hamiltonianas (HMC) y Redes de Creencias
Bayesianas (BBN) en la macroeconomía de la complejidad distributiva*

Andrés Giuseppe

*Doctor en Economía y Doctor en Gerencia
Universidad Central de Venezuela (UCV)*

Poli-data.com
Agosto, 2025

Sustitución de los Métodos Lineales por la Geometría de Probabilidad: Cadenas de Montecarlo Hamiltonianas (HMC) y Redes de Creencias Bayesianas (BBN) en la Macroeconomía Dinámica de la Complejidad Distributiva

Documento de Trabajo N.º 2 — Serie Macroeconomía Dinámica de la Complejidad Distributiva (MDCD)

© 2025, Andrés Giuseppe.

Se autoriza la reproducción total o parcial de este documento por cualquier medio, citando adecuadamente la fuente y al autor. Las opiniones, interpretaciones y eventuales errores expresados en este documento son de la exclusiva responsabilidad del autor y no comprometen a la Universidad Central de Venezuela ni a ninguna otra institución mencionada en el texto.

Forma de citación sugerida:

Giuseppe, A. (2025: Agosto, 10). Sustitución de los métodos lineales por la geometría de probabilidad: cadenas de Montecarlo Hamiltonianas (HMC) y redes de creencias bayesianas (BBN) en la Macroeconomía Dinámica de la Complejidad Distributiva. Documento de Trabajo MDCD N.º 2. Poli-data.com.

Documento relacionado en esta misma serie:

Giuseppe, A. (2025: Junio, 03). Endogenización de la restricción de inversión y el costo de uso del capital: hacia una Macroeconomía Dinámica de la Complejidad Distributiva. Documento de Trabajo MDCD N.º 1. Poli-data.com.

Fuente de los datos estadísticos:

Matriz del Índice de Distribución Justa y Bienestar Multidimensional (IDJ+BM), 73 países (2021-2024), elaborada a partir de Giuseppe (2024), Tesis Doctoral, FACES-CEAP, Universidad Central de Venezuela, con datos del Banco Mundial, el FMI, Eurostat, la OCDE, el PNUD y Naciones Unidas.

Diseño, diagramación y corrección de estilo: edición asistida.

Contacto: Poli-data.com

Índice

Resumen	1
Abstract	1
1. Introducción: la pregunta por el instrumental, no solo por el modelo	3
2. Marco teórico: los límites del enfoque lineal-gaussiano.....	4
2.1 El método de Blanchard-Kahn y la silla de montar determinística	4
2.2 La ecuación de Euler como punto fijo	4
2.3 Por qué la suma ponderada lineal distorsiona la inferencia	5
3. Metodología: de las Redes de Creencias Bayesianas al Monte Carlo Hamiltoniano	6
3.1 Arquitectura de la Red de Creencias Bayesiana (BBN) del IDJ+BM	6
3.2 El motor estadístico: de MCMC al gradiente hamiltoniano (HMC)	8
3.3 La ecuación de Euler como problema de geometría de probabilidad.....	9
3.4 Las diez preguntas heurísticas como protocolo de inferencia inversa.....	10
4. Evidencia aplicada: linealidad frente a geometría de probabilidad.....	11
4.1 El ranking lineal del IDJ+BM	11
4.2 La paradoja de la soberanía	12
4.3 El experimento contrafactual: el Delta de Autonomía de Argentina	14
4.4 Análisis de sensibilidad: la robustez aparente del índice lineal.....	14
5. Discusión: implicaciones para la solución de modelos macroeconómicos.....	15
5.1 La aceleración no lineal del riesgo: evidencia complementaria	15
5.2 Más allá de Blanchard-Kahn: hacia una variedad de silla probabilística	16
5.3 Límites y precauciones epistemológicas.....	17
6. Conclusiones y agenda de investigación	17
Referencias	19

Resumen

Este artículo constituye el segundo pilar metodológico del programa de investigación Macroeconomía Dinámica de la Complejidad Distributiva (MDCD), propuesto por el autor. Mientras el primer documento de esta serie endogenizó la restricción de inversión y el costo de uso del capital mediante una prima de entropía distributiva, este trabajo se concentra en una pregunta distinta y complementaria: **¿con qué instrumental matemático debe resolverse un sistema macroeconómico gobernado por umbrales no lineales, colas pesadas y variables profundamente interdependientes?** Se argumenta que los métodos de solución lineal-gaussianos de la macroeconomía dinámica ortodoxa —desde la linealización de Blanchard y Kahn (1980) alrededor de un estado estacionario único hasta la ecuación de Euler resuelta como un punto fijo determinístico— son estructuralmente incapaces de representar la geometría de un sistema con puntos de inflexión (34%, 42% y 50% de participación salarial) y eventos de cola pesada (hiperinflación, insolvencia soberana). Frente a ello, se propone sustituir la suma ponderada lineal y la aproximación de primer orden por dos instrumentos de **geometría de probabilidad**: las **Redes de Creencias Bayesianas (BBN)**, que modelan la estructura causal condicional del sistema mediante un grafo acíclico dirigido con la Remuneración de Asalariados (RE%) como nodo *hub* y la Robustez Soberana (RS) como válvula de seguridad termodinámica; y el **Monte Carlo Hamiltoniano (HMC)**, con su muestreador NUTS, que explora la distribución posterior de los estados del sistema utilizando el gradiente de la función de probabilidad en lugar de una caminata aleatoria o una aproximación lineal local. Mediante un ejercicio aplicado con datos del Índice de Distribución Justa y Bienestar Multidimensional (IDJ+BM) para una muestra de países seleccionados, se muestra que el ranking lineal del índice oculta una **paradoja de soberanía**: economías que lideran el ranking aritmético (Estados Unidos, Alemania) exhiben simultáneamente probabilidades posteriores de insolvencia estructural superiores al 75%, un riesgo invisible para la suma ponderada pero explícito en la inferencia bayesiana. Se presenta además un experimento contrafactual —el «Delta de Autonomía» de Argentina— que cuantifica el retorno geopolítico de una reforma salarial mediante simulación de la red, y un análisis de sensibilidad que evidencia los límites de la robustez puramente aritmética del índice lineal. El artículo concluye situando este instrumental dentro de una agenda de investigación que reclama su validación mediante programación probabilística formal (Stan, PyMC), diagnósticos de convergencia y análisis de sensibilidad de los *priors*, evitando todo exceso de confianza inferencial.

Palabras clave: Monte Carlo Hamiltoniano; redes de creencias bayesianas; geometría de probabilidad; método de Blanchard-Kahn; muestreador NUTS; IDJ+BM; Macroeconomía Dinámica de la Complejidad Distributiva; inferencia bayesiana aplicada.

Abstract

This paper constitutes the second methodological pillar of the Dynamic Macroeconomics of Distributive Complexity (DMDC) research program proposed by the author. While the first working paper in this series endogenized the investment constraint and the user cost of capital through a distributive-entropy premium, this paper addresses a distinct, complementary question: **with what mathematical instrumentarium should a macroeconomic system governed by non-linear thresholds, heavy tails, and deeply interdependent variables be solved?** It is argued that the linear-Gaussian solution methods of orthodox dynamic macroeconomics —from the Blanchard and Kahn (1980) linearization around a unique steady state to the Euler equation solved as a deterministic fixed point— are structurally unable to represent the geometry of a system with tipping points (34%, 42% and 50% wage-share thresholds) and heavy-tail events (hyperinflation, sovereign insolvency). Against this backdrop, the paper proposes replacing the linear weighted sum and the first-order approximation with two instruments of **probability geometry: Bayesian Belief Networks (BBN)**, which model the system's conditional causal structure through a directed acyclic graph with the wage share (RE%) as the hub node and Sovereign Robustness (RS) as a thermodynamic safety valve; and **Hamiltonian Monte Carlo (HMC)**, with its NUTS sampler, which explores the posterior distribution of system states using the gradient of the probability function instead of a random walk or a local linear approximation. Through an applied exercise using data from the Fair Distribution and Multidimensional Wellbeing Index (IDJ+BM) for a selected sample of countries, the paper shows that the index's linear ranking conceals a **sovereignty paradox**: economies that lead the arithmetic ranking (United States, Germany) simultaneously exhibit posterior probabilities of structural insolvency above 75%, a risk invisible to the weighted sum but explicit under Bayesian inference. A counterfactual experiment —Argentina's «Autonomy Delta»— quantifies the geopolitical return of a wage reform through network simulation, and a sensitivity analysis exposes the limits of the index's purely arithmetic robustness. The paper concludes by situating this instrumentarium within a research agenda that calls for its validation through formal probabilistic programming (Stan, PyMC), convergence diagnostics, and prior-sensitivity analysis, avoiding any excess of inferential confidence.

Keywords: Hamiltonian Monte Carlo; Bayesian belief networks; probability geometry; Blanchard-Kahn method; NUTS sampler; IDJ+BM; Dynamic Macroeconomics of Distributive Complexity; applied Bayesian inference.

1. Introducción: la pregunta por el instrumental, no solo por el modelo

El documento de trabajo anterior de esta serie propuso endogenizar la restricción de inversión mediante un Costo de Uso del Capital Ampliado (CUCA), en el cual la participación salarial (RE%) y la Robustez Soberana (RS) modulan, de forma no lineal y por tramos, la tasa de descuento efectiva que enfrenta la empresa. Esa propuesta resolvió una pregunta de **contenido**: qué variables deben entrar en la ecuación de Euler. Este segundo documento aborda una pregunta distinta, de **instrumental**: una vez aceptado que el sistema macroeconómico está gobernado por umbrales críticos (34%, 42%, 50% de RE%), no linealidades y eventos de cola pesada, ¿qué aparato matemático es capaz de resolverlo sin distorsionar su geometría?

La respuesta que ofrece la macroeconomía dinámica ortodoxa es, en esencia, una sola: la **linealización**. Desde la solución de Blanchard y Kahn (1980) para sistemas de expectativas racionales —que separa los autovalores estables e inestables de la dinámica linealizada alrededor de un único estado estacionario para encontrar una trayectoria de silla (*saddle path*) determinística— hasta la calibración estándar de los modelos DSGE de la síntesis neokeynesiana, el instrumental dominante aproxima la economía mediante una expansión de primer orden alrededor de un punto fijo, bajo el supuesto implícito de que los choques son pequeños, simétricos y aproximadamente gaussianos.

Este artículo sostiene que dicho instrumental es **categoricamente inadecuado** para resolver un sistema en el que la variable de estado central —la participación salarial— exhibe regímenes discretos con probabilidades de transición condicionales (PADI, PMDI, PBDI, PPDI), en el que los choques relevantes (hiperinflación, sanciones financieras, colapso de reservas) no son pequeños ni gaussianos, y en el que las variables no se relacionan mediante una suma ponderada de efectos independientes, sino mediante una **estructura causal condicional**: la Robustez Soberana no es un sumando más en un índice, sino una válvula que, cuando se cierra, bloquea la transmisión de cualquier mejora distributiva hacia el bienestar, independientemente de cuánto mejoren las demás variables.

La propuesta metodológica de este documento consiste en sustituir dos piezas del instrumental lineal por sus análogos de **geometría de probabilidad**. En primer lugar, la suma ponderada de indicadores —el método con el que tradicionalmente se han construido los índices compuestos de desarrollo— se sustituye por una **Red de Creencias Bayesiana (BBN)**: un grafo acíclico dirigido que representa explícitamente las dependencias condicionales entre los nodos del sistema. En segundo lugar, la linealización de Blanchard-Kahn alrededor de un punto fijo se sustituye por el **Monte Carlo Hamiltoniano (HMC)**, un algoritmo de muestreo que, en lugar de buscar un único equilibrio determinístico, explora la **distribución posterior completa** de los estados plausibles del sistema, desplazándose sobre la superficie de probabilidad mediante el gradiente de su función

de verosimilitud, de forma análoga a como una partícula física se desliza sobre un campo de potencial.

La tesis central puede resumirse así: la macroeconomía ortodoxa busca el **punto** de equilibrio; la Macroeconomía Dinámica de la Complejidad Distributiva explora la **geometría** del espacio de estados posibles, y reporta la probabilidad —no la certeza— de que un país transite hacia la estabilidad, el colapso o la trampa estructural. Esta sustitución metodológica no es un mero ejercicio técnico: como se mostrará en la sección 4, tiene consecuencias sustantivas sobre el diagnóstico de países que el ranking lineal del IDJ+BM clasifica como exitosos, y que la inferencia bayesiana revela como estructuralmente frágiles.

El artículo se organiza como sigue. La sección 2 examina los límites del enfoque lineal-gaussiano, desde el método de Blanchard-Kahn hasta la ecuación de Euler como punto fijo. La sección 3 desarrolla la arquitectura metodológica propuesta: la Red de Creencias Bayesiana del IDJ+BM, el motor estadístico del Monte Carlo Hamiltoniano, y su reinterpretación de la ecuación de Euler como un problema de geometría de probabilidad. La sección 4 aplica este instrumental a un conjunto de países, contrastando el ranking lineal con la inferencia bayesiana, y presenta un experimento contrafactual y un análisis de sensibilidad. La sección 5 discute las implicaciones para la teoría de la solución de modelos macroeconómicos y las precauciones epistemológicas pertinentes. La sección 6 concluye.

2. Marco teórico: los límites del enfoque lineal-gaussiano

2.1 El método de Blanchard-Kahn y la silla de montar determinística

El procedimiento estándar para resolver modelos dinámicos de expectativas racionales — formalizado por Blanchard y Kahn (1980)— consiste en linealizar el sistema de ecuaciones en diferencias alrededor de su estado estacionario, expresarlo en forma matricial, y descomponer la matriz de transición en sus autovalores estables e inestables. La condición de Blanchard-Kahn exige que el número de autovalores fuera del círculo unitario coincida exactamente con el número de variables de salto (*forward-looking*) del sistema, garantizando una **trayectoria de silla única**: una y solo una secuencia de ajuste que conduce al sistema, sin explosión ni indeterminación, hacia su estado estacionario de largo plazo.

Este procedimiento, que constituye la columna vertebral computacional de la mayoría de los modelos DSGE empleados por bancos centrales y organismos multilaterales, descansa sobre tres supuestos que merecen escrutinio en el contexto de la MDCD. Primero, supone que **existe un único estado estacionario** relevante, en torno al cual el sistema oscila ante choques transitorios; la taxonomía PADI/PMDI/PBDI/PPDI, en cambio, describe **regímenes múltiples** con probabilidades de transición entre ellos, no un punto de atracción único. Segundo, supone que

los choques son **suficientemente pequeños** como para que la aproximación de primer orden no introduzca errores sustanciales; sin embargo, los episodios documentados en la sección 4 de este artículo —hiperinflación superior al 100% anual, colapso de reservas internacionales— son, por definición, choques grandes, para los cuales la linealización pierde validez. Tercero, supone que la dinámica del sistema es **suave y diferenciable** en todo el dominio relevante; los umbrales de 34%, 42% y 50% de RE%, en cambio, introducen **discontinuidades de régimen** —la propia Proposición 2 del primer documento de esta serie, que postula una función de prima de entropía no lineal y convexa por tramos— que una expansión de Taylor de primer orden no puede representar sin un error de aproximación creciente precisamente en las zonas de mayor interés para la política pública: los entornos de los umbrales críticos.

2.2 La ecuación de Euler como punto fijo: el caso degenerado de un sistema complejo

La ecuación de Euler de la empresa, $r + \delta = F'(K)$, resuelta bajo el método de Blanchard-Kahn, entrega una trayectoria de inversión **determinística**: dado un nivel de capital inicial y una senda esperada de la tasa de interés, existe una y solo una trayectoria óptima de acumulación. Esta propiedad —deseable por su tractabilidad analítica— es, en términos de la teoría de sistemas complejos, el **caso degenerado** de un problema mucho más general: el de un sistema cuya variable de estado relevante (en este caso, RE%) no se mueve en un continuo suave, sino que transita probabilísticamente entre regímenes cualitativamente distintos, cada uno con su propia dinámica local.

Cuando se introduce el Costo de Uso del Capital Ampliado (CUCA) propuesto en el primer documento de esta serie — $r + \delta + \Omega(\text{RE}\%, \text{RS})$, con Ω convexa por tramos—, la condición de Blanchard-Kahn deja de ser, en sentido estricto, aplicable sin modificación: la matriz de transición linealizada alrededor de un estado estacionario deja de ser representativa del comportamiento del sistema en los tramos donde Ω se activa de forma abrupta. El sistema exige, en consecuencia, un instrumental que no presuponga la existencia de una única trayectoria de silla, sino que sea capaz de **representar la incertidumbre sobre el régimen** en el que se encuentra el país y la probabilidad de transitar hacia otro.

2.3 Por qué la suma ponderada lineal distorsiona la inferencia: el caso de los índices compuestos

El problema no se limita a la resolución de modelos dinámicos: afecta también a la construcción misma de los indicadores con los que se mide el fenómeno. La práctica estándar de los índices compuestos de desarrollo —incluida la versión aritmética del propio IDJ+BM, calculada como el promedio simple de diez variables normalizadas— asume que cada variable contribuye de forma **independiente y aditiva** al resultado final. Esta arquitectura, conveniente por su simplicidad y

transparencia, oculta sin embargo dos fenómenos centrales para el diagnóstico de soberanía económica.

- **Interdependencia condicional:** la Robustez Soberana no es un sumando más; es una condición que, cuando falla, **bloquea** la transmisión de las mejoras de otras variables hacia el bienestar. Una mejora simultánea en Salud y en Gobernanza Digital no produce el mismo efecto sobre la estabilidad sistémica si ocurre en un país con Robustez Soberana alta que si ocurre en un país con Robustez Soberana colapsada: en el segundo caso, ambas mejoras son, en términos de la red causal, insostenibles. La suma ponderada no puede representar esta condicionalidad; el promedio aritmético trata ambos casos como equivalentes si los puntajes nominales coinciden.
- **Riesgo de cola oculto por el promedio:** un índice que promedia diez dimensiones puede producir un puntaje agregado «aceptable» para un país en el que una sola dimensión — por ejemplo, la Robustez Soberana— se encuentre en una zona de riesgo extremo. El promedio, por construcción, **diluye** la señal de alarma de la variable crítica entre las demás variables, ofreciendo una falsa sensación de estabilidad agregada que la sección 4 de este artículo documenta empíricamente para el caso de Estados Unidos y Alemania.

La conclusión de esta sección es que la sustitución metodológica propuesta no responde a una preferencia estética por la complejidad computacional, sino a una necesidad impuesta por la propia naturaleza del fenómeno: un sistema con regímenes múltiples, choques de cola pesada y dependencias condicionales no puede resolverse —ni medirse— de forma fiable mediante instrumentos diseñados para sistemas lineales, suaves y aditivos.

3. Metodología: de las Redes de Creencias Bayesianas al Monte Carlo Hamiltoniano

3.1 Arquitectura de la Red de Creencias Bayesiana (BBN) del IDJ+BM

La primera sustitución propuesta reemplaza la suma ponderada de las diez variables del IDJ+BM por una **Red de Creencias Bayesiana (BBN)**: un grafo acíclico dirigido (DAG) en el que cada nodo representa una variable del sistema y cada arista una dependencia condicional estimada o postulada teóricamente. La arquitectura se organiza en cuatro capas:

- **Capa de entorno e insumos:** el Salario Mínimo Interprofesional, la calidad de las Instituciones y el tamaño del PIB constituyen las condiciones iniciales y las palancas de política que alimentan el sistema.
- **El nodo hub: Remuneración de Asalariados (RE%):** el corazón de la red. Por su posición topológica —con el mayor número de aristas salientes hacia el resto del sistema—, conocer el valor de RE% reduce más la incertidumbre sobre el resto de la red que conocer

cualquier otra variable individual: condiciona la capacidad fiscal, la estabilidad del desempleo y, en última instancia, la probabilidad de que el país pertenezca a cada uno de los cuatro bloques distributivos (PADI, PMDI, PBDI, PPDl).

- **Capa de procesos y mecanismos de transmisión:** la Capacidad Fiscal y el Desempleo, condicionados por RE%, procesan la riqueza distribuida antes de que esta se traduzca en resultados de bienestar.
- **El filtro de soberanía: Robustez Soberana (RS):** el nodo de mayor no linealidad del sistema. Funciona como una válvula que, si se cierra (RS baja), bloquea la transmisión de cualquier mejora distributiva hacia los resultados de bienestar —Gobernanza Digital, Salud, resistencia inflacionaria—, independientemente de cuán favorables sean las demás variables.
- **Capa de resultados (IBM):** Salud, Gobernanza Digital (EGDI), resistencia inflacionaria y Huella Ecológica, que no dependen linealmente del PIB, sino de la combinación condicional de Capacidad Fiscal y Robustez Soberana.

Esta arquitectura se opera mediante **Tablas de Probabilidad Condicional (CPT)** que cuantifican, para cada nodo, la probabilidad de sus estados posibles dado el estado de sus nodos padres. El Cuadro 1 reproduce la tabla que gobierna el nodo central —la probabilidad de pertenencia a cada bloque distributivo condicionada a la fortaleza institucional y al nivel de PIB per cápita.

Cuadro 1. P(Distribución | Instituciones, PIB per cápita)

Instituciones	PIB per cápita	P(PPDI)	P(PBDI)	P(PMDI)	P(PADI)
Débiles	Bajo	0,80	0,15	0,04	0,01
Débiles	Alto	0,50	0,30	0,15	0,05
Fuertes	Bajo	0,40	0,30	0,20	0,10
Fuertes	Alto	0,05	0,10	0,25	0,60

Tabla de Probabilidad Condicional del nodo Hub. Elaboración propia a partir de Giussepe (2024).

La lectura del Cuadro 1 es contundente: el crecimiento económico por sí solo —PIB per cápita alto— no garantiza una distribución justa. Si las instituciones son débiles, la probabilidad de alcanzar el estatus PADI permanece marginal (5%) incluso con PIB alto, mientras que la combinación de instituciones fuertes y PIB alto eleva esa probabilidad al 60%. La estructura institucional, no el tamaño de la economía, es la variable que condiciona el bloque distributivo de destino.

El Cuadro 2 presenta la tabla más crítica del modelo: la probabilidad de pérdida de soberanía financiera condicionada al bloque distributivo y al nivel de desempleo. Aquí se codifica explícitamente la no linealidad central de la propuesta: ante un mismo choque de desempleo, el riesgo de insolvencia no aumenta de forma proporcional entre bloques, sino que **salta de fase**.

Cuadro 2. P(Pérdida de soberanía = Alta | Bloque distributivo, Desempleo)

Bloque distributivo	Desempleo	P(Pérdida de soberanía)	Caracterización
PADI	Bajo	0,01	Autonomía total
PADI	Alto	0,05	Solvencia sostenida
PMDI	Bajo	0,20	Soberanía condicionada
PMDI	Alto	0,40	Déficit estructural
PBDI	Bajo	0,50	Fragilidad financiera
PBDI	Alto	0,70	Crisis de liquidez
PPDI	Bajo	0,90	Dependencia crítica
PPDI	Alto	0,99	Quiebra soberana

Elaboración propia a partir de Giussepe (2024). Bloques distributivos: PADI ($RE\% \geq 50$), PMDI (42-50), PBDI (34-42), PPDI ($RE\% \leq 34$).

Un país PADI que enfrenta un choque de desempleo alto ve su riesgo de insolvencia subir apenas a 5%, gracias a la recaudación y las reservas acumuladas previamente; un país PBDI, sometido al mismo choque, salta a 70%. Esta diferencia de **catorce veces** entre bloques —y no una diferencia proporcional al nivel de desempleo— es precisamente el tipo de relación que un modelo lineal, por construcción, no puede representar: cualquier coeficiente único calibrado sobre el conjunto de la muestra subestimaré sistemáticamente el riesgo en los bloques bajos y lo sobreestimaré en los bloques altos.

3.2 El motor estadístico: del muestreo aleatorio (MCMC) al gradiente hamiltoniano (HMC)

Una red de creencias bayesiana especifica la estructura causal del sistema, pero para estimar la distribución posterior de sus parámetros —y, con ella, la incertidumbre asociada a cada diagnóstico— es necesario un motor de muestreo. Las primeras implementaciones de modelos bayesianos jerárquicos recurrieron a algoritmos **MCMC (Markov Chain Monte Carlo)** convencionales, como el muestreo de Gibbs, que explora el espacio de parámetros mediante una **caminata aleatoria**: en cada iteración, el algoritmo propone un nuevo punto en una vecindad del punto actual y lo acepta o rechaza según un criterio probabilístico. Este procedimiento es efectivo en espacios de pocas dimensiones y baja correlación, pero se degrada severamente cuando las variables están tan correlacionadas entre sí como lo están las diez variables del IDJ+BM —en particular, la relación sistémica entre RE% y Robustez Soberana descrita en la sección 3.1—, generando lo que en la literatura se conoce como mezcla lenta (*slow mixing*): el algoritmo emplea miles de iteraciones para explorar adecuadamente regiones de alta probabilidad que están conectadas por «crestas» estrechas y oblicuas del espacio de parámetros.

El **Monte Carlo Hamiltoniano (HMC)** —desarrollado en la física estadística y adoptado por la estadística bayesiana computacional moderna (Neal, 2011)— resuelve este problema introduciendo una variable auxiliar de **momento** (p) y tratando la exploración del espacio de parámetros como la simulación de la trayectoria de una partícula física que se desliza sobre la superficie de la distribución de probabilidad posterior, impulsada por el **gradiente** de dicha superficie. En lugar de proponer saltos aleatorios, el algoritmo sigue la pendiente de mayor verosimilitud, lo que reduce drásticamente la autocorrelación de la cadena y permite explorar eficientemente espacios de alta dimensión con variables fuertemente correlacionadas —exactamente el escenario que describen las diez variables del IDJ+BM.

Formalmente, se define un Hamiltoniano $H(\beta, p)$ como la suma de una energía potencial y una energía cinética:

$$H(\beta, p) = U(\beta) + K(p)$$

donde $U(\beta) = -\log[P(D | \beta) P(\beta)]$ es la energía potencial —el logaritmo negativo de la densidad posterior de los parámetros β del sistema, dados los datos D observados para los 73 países—, y $K(p) = \frac{1}{2} p^t M^{-1} p$ es la energía cinética, con M una matriz de masa que regula la escala de los saltos propuestos. La trayectoria de la partícula se simula mediante el **integrador Leapfrog (salto de rana)**, que actualiza momento y posición en tres pasos por cada iteración L :

$$p(t+\epsilon/2) = p(t) - (\epsilon/2) \nabla U(\beta(t)) \quad \beta(t+\epsilon) = \beta(t) + \epsilon M^{-1} p(t+\epsilon/2) \quad p(t+\epsilon) = p(t+\epsilon/2) - (\epsilon/2) \nabla U(\beta(t+\epsilon))$$

Al final de la trayectoria simulada, el nuevo estado propuesto (β, p) se acepta o rechaza mediante un criterio de Metropolis basado en la conservación de energía,

$$\alpha = \min\{1, \exp[H(\beta(t), p(t)) - H(\beta^*, p^*)]\}$$

Debido a que la dinámica hamiltoniana conserva la energía total del sistema de forma aproximada, la tasa de aceptación del HMC es característicamente alta —cercana al 100% en implementaciones bien calibradas—, lo que reduce el desperdicio computacional propio de la caminata aleatoria del MCMC tradicional. El muestreador **NUTS (No-U-Turn Sampler)** de Hoffman y Gelman (2014) automatiza, además, la elección de la longitud de la trayectoria L , deteniendo la simulación en el momento en que la partícula comienza a «regresar sobre sus propios pasos», lo que elimina la necesidad de calibrar manualmente este hiperparámetro y constituye el estándar de facto en la estadística bayesiana computacional contemporánea (Gelman et al., 2013).

3.3 La ecuación de Euler como problema de geometría de probabilidad

La contribución teórica central de este documento consiste en tender un puente explícito entre el motor HMC descrito y la ecuación de Euler aumentada del primer documento de esta serie.

Recuérdese que el Costo de Uso del Capital Ampliado se definía como $CUCA = r + \delta + \Omega(RE\%, RS)$, con Ω una función convexa y no suave por tramos. La condición de primer orden de la empresa, $F'(K) = CUCA$, deja de tener una solución analítica única y estable en el sentido de Blanchard-Kahn precisamente en los tramos donde Ω se activa de forma abrupta —en el entorno de los umbrales de 34% y 42% de RE%—, porque la matriz jacobiana del sistema linealizado no está bien definida en los puntos de quiebre de una función convexa por tramos.

Se propone, en consecuencia, reinterpretar el problema de inversión no como la búsqueda de un punto fijo determinístico, sino como la exploración de la **distribución posterior conjunta** del vector de estado $(K, RE\%, RS)$ dado el historial observado de la economía. Bajo esta reinterpretación, la energía potencial del sistema hamiltoniano, $U(\beta)$, adquiere un significado económico preciso: es, hasta una constante, el **logaritmo negativo de la probabilidad de estabilidad sistémica** del país, y su gradiente, $\nabla U(\beta)$, es la fuerza generalizada que la sección 3.2 describe como el «empuje» que aleja o acerca a la partícula económica de los atractores de colapso. Esta fuerza generalizada es, en términos del primer documento de esta serie, **formalmente análoga** a la prima de entropía $\Omega(RE\%, RS)$: ambas miden cuánto se aleja el sistema de su configuración de mínima fricción distributiva.

La implicación metodológica es directa: en lugar de calcular una única trayectoria de inversión óptima —como exigiría el método de Blanchard-Kahn aplicado al CUCA—, el motor HMC genera un **conjunto de trayectorias plausibles** (una cadena de Markov de estados posteriores), cuya dispersión informa directamente sobre la incertidumbre estructural que enfrenta la empresa al decidir su inversión. Un país cuya cadena posterior de RE% se concentra estrechamente en la región PADI exhibe una incertidumbre de inversión baja —coherente con la menor volatilidad documentada empíricamente en el primer documento de esta serie (1,2% en PADI frente a 4,8% en PPDI)—; un país cuya cadena posterior se dispersa entre PBDI y PPDI, en cambio, exhibe una incertidumbre estructural que ningún punto fijo determinístico puede capturar, y que es, precisamente, la señal de alarma que el método lineal de Blanchard-Kahn no está diseñado para emitir.

3.4 Las diez preguntas heurísticas como protocolo de inferencia inversa

Para operacionalizar la red bayesiana como herramienta de prospectiva, se ha diseñado un protocolo de diez preguntas heurísticas formuladas como **inferencia inversa**: en lugar de preguntar «qué ocurrirá», cada pregunta indaga «qué tan probable es el estado deseado (soberanía, estabilidad, modernización) dado el estado actual de la evidencia (RE%, RS, desempleo, inflación)». El Cuadro 3 resume cinco de las diez preguntas que se emplean en la sección 4 de este artículo; las cinco restantes —relativas a la tensión ambiental, el multiplicador digital, la inmunidad biopolítica, el umbral de erosión inflacionaria y el alineamiento

geopolítico— se documentan en el trabajo original de Giuseppe (2024) y no se desarrollan aquí por razones de espacio.

Cuadro 3. Protocolo de inferencia inversa: cinco preguntas heurísticas seleccionadas

#	Pregunta heurística	Sintaxis bayesiana	Mecanismo HMC
Q1	Diagnóstico de dependencia estructural (riesgo de insolvencia)	$P(\text{Soberanía} = \text{Pérdida} \mid \text{RE}, \text{Desempleo})$	Detecta «zonas de sombra»: PIB alto con fragilidad fiscal oculta.
Q2	Simulador de retorno soberano (Delta de Autonomía)	$\Delta P = P(\text{Insolvencia} \mid \text{RE}_{\text{actual}}) - P(\text{Insolvencia} \mid \text{RE}_{\text{superior}})$	Cuantifica el retorno de una reforma salarial como desplazamiento de la cadena posterior.
Q3	Estrés sistémico (blindaje ante crisis)	$P(\text{RS} = \text{Estable} \mid \text{RE}_{\text{actual}}, \text{Desempleo} = \text{Crisis})$	Identifica puntos de ruptura (tipping points) ante choques abruptos.
Q7	Trampa de la deuda (inercia del sistema)	$P(\text{RE} < \text{Bloque superior} \mid \text{RS} = \text{Baja})$	Mide la barrera de potencial que la deuda impone a la mejora distributiva.
Q10	Alineamiento geopolítico (cluster de autonomía)	$P(Z = \text{Autonomía} \mid \text{Evidencia total})$	Clasifica la nación según la geometría de su posición en el espacio de 10 dimensiones.

Elaboración propia a partir de la operacionalización propuesta en Giuseppe (2024).

Es importante precisar el estatus epistemológico de este protocolo: las preguntas heurísticas constituyen una **especificación de inferencia**, no un resultado ya validado mediante estimación formal sobre un panel extenso de países. La sección 5.3 de este artículo retoma esta precaución con el detalle que merece.

4. Evidencia aplicada: linealidad frente a geometría de probabilidad en diez países

4.1 El ranking lineal del IDJ+BM

Como punto de partida, el Cuadro 4 reproduce el ranking lineal piloto del IDJ+BM —calculado como el promedio simple de las diez variables normalizadas— para una muestra seleccionada de diez países en 2024. Este es el instrumento que, según se argumentó en la sección 2.3, oculta la estructura causal condicional del sistema detrás de un escalár único.

Cuadro 4. Ranking lineal piloto del IDJ+BM (2024)

País	RE% PIB	Robustez (Res/Deuda)	IDJ+BM lineal	Clasificación
Suiza	59,2%	0,52	0,765	PADI (Muy Alto)
Islandia	53,3%	0,33	0,740	PADI (Muy Alto)
EE.UU.	53,5%	0,02	0,706	PADI (Alto)
Alemania	54,5%	0,05	0,664	PADI (Alto)
China	53,8%	1,28	0,538	PMDI (Mediano)
Chile	42,5%	0,21	0,504	PMDI (Mediano)
Brasil	44,2%	0,58	0,482	PMDI (Mediano)
Argentina	42,5%	0,10	0,449	PBDI (Vulnerable)
Nigeria	26,5%	0,38	0,279	PPDI (Bajo)
Venezuela	24,5%	0,06	0,276	PPDI (Bajo)

Elaboración propia a partir de Giussepe (2024). El IDJ+BM lineal se calcula como el promedio simple de las diez variables normalizadas (método Min-Max).

Bajo esta lectura, el bloque PADI —liderado por Suiza, Islandia, Estados Unidos y Alemania— aparece como una categoría homogénea de éxito sistémico. La sección siguiente muestra que esa homogeneidad es un artefacto del promedio aritmético.

4.2 La paradoja de la soberanía: lo que el promedio lineal disuelve

El Cuadro 5 presenta, para los mismos países, las probabilidades posteriores estimadas por la red bayesiana para tres de las diez preguntas heurísticas: la probabilidad de insolvencia estructural (Q1), el retorno potencial de una reforma distributiva (Q2) y el puntaje de autonomía estratégica (Q10), que sintetiza la posición del país en el espacio completo de diez dimensiones.

Cuadro 5. Inferencia bayesiana: probabilidad de insolvencia, retorno de reforma y autonomía estratégica

País	Q1: Insolvencia	Q2: Retorno reforma	Q10: Autonomía estratégica	Diagnóstico bayesiano
Suiza	0,012	0,000	0,842	Robustez total: equilibrio sistémico
China	0,045	0,145	0,785	Potencia soberana: alta capacidad de maniobra
EE.UU.	0,820	0,110	0,675	Fragilidad soberana: bienestar financiado por deuda
Alemania	0,750	0,120	0,654	Fragilidad soberana: bienestar financiado por deuda

País	Q1: Insolvencia	Q2: Retorno reforma	Q10: Autonomía estratégica	Diagnóstico bayesiano
Brasil	0,125	0,220	0,552	Posición intermedia con margen de reforma
Chile	0,410	0,245	0,518	Posición intermedia con margen de reforma
Argentina	0,850	0,280	0,421	Trampa de dependencia: urge reforma distributiva
Nigeria	0,880	0,395	0,275	Entropía sistémica: desconexión RE-bienestar
Venezuela	0,960	0,410	0,242	Entropía sistémica: desconexión RE-bienestar

Elaboración propia a partir de la operacionalización del modelo bayesiano jerárquico propuesta en Giussepe (2024). Valores ilustrativos de la especificación piloto de la red; pendientes de validación mediante estimación formal sobre panel extenso (véase sección 5.3).

La lectura conjunta de los Cuadros 4 y 5 revela la **paradoja de la soberanía** que da título a esta sección. Estados Unidos y Alemania ocupan el tercer y cuarto lugar, respectivamente, del ranking lineal —ambos clasificados como PADI «Alto»—, y sin embargo exhiben una probabilidad de insolvencia estructural posterior de 0,82 y 0,75: superior, en ambos casos, a la de Argentina en términos relativos a su propio bloque, y muy por encima de la de China (0,045), un país que el ranking lineal ubica dos posiciones por debajo.

El mecanismo causal es el que describe el Cuadro 2 de la sección 3.1: el puntaje lineal de Estados Unidos y Alemania está sostenido por variables de PIB per cápita, salud e infraestructura digital, pero su Robustez Soberana —0,02 y 0,05, respectivamente— se encuentra en el tramo de mayor fragilidad de la red causal. El promedio aritmético del IDJ+BM diluye esta señal de alarma entre las restantes nueve variables; la red bayesiana, en cambio, la propaga explícitamente porque la Robustez Soberana actúa como nodo condicionante —no como sumando— del resto del sistema.

China ofrece el contraste especular: su posición intermedia en el ranking lineal (PMDI, quinto lugar) esconde una Robustez Soberana excepcionalmente alta (1,28), que la red bayesiana traduce en la segunda probabilidad de autonomía estratégica más alta de la muestra (0,785), apenas por debajo de Suiza. Esta es, en términos del primer documento de esta serie, la manifestación empírica de la Proposición 3 de sustituibilidad parcial entre RE% y Robustez Soberana: China combina una participación salarial PADI con un colchón soberano que blindará al sistema incluso frente a la desaceleración del sector inmobiliario.

4.3 El experimento contrafactual: el Delta de Autonomía de Argentina

La pregunta heurística Q2 permite ilustrar la potencia prescriptiva del instrumental propuesto mediante un ejercicio contrafactual concreto. Tómese el caso de Argentina, clasificada en el bloque PBDI con una RE% de 39,2% en 2024.

- **Escenario base:** con la evidencia actual —RE% = 39,2%—, el motor de inferencia estima una probabilidad de insolvencia de 0,62.
- **Escenario simulado:** se fuerza el nodo RE% al mínimo del bloque superior (PMDI), es decir, 42,5% —un incremento de apenas 3,3 puntos porcentuales—. Con esta nueva evidencia, la probabilidad de insolvencia estimada cae a 0,38.
- **Delta de Autonomía:** $\Delta P = 0,62 - 0,38 = 0,24$ (24 puntos porcentuales).

La interpretación económica de este resultado es la que distingue al instrumental de geometría de probabilidad de un simple ejercicio de sensibilidad lineal: el retorno de un aumento salarial de 3,3 puntos porcentuales no se mide únicamente en términos de equidad social, sino en una **reducción cuantificable de 24 puntos en el riesgo de colapso financiero del país**, propagada a través de la estructura causal completa de la red —vía la capacidad fiscal y la consiguiente recomposición de la Robustez Soberana—, no como un efecto lineal directo de la variable RE% sobre la variable RS. Bajo un modelo de regresión lineal simple calibrado sobre el conjunto de la muestra, el coeficiente estimado para un cambio de esta magnitud habría arrojado un rango impreciso —del orden de 15 a 30 puntos, dada la heterogeneidad de pendientes documentada en el Cuadro 2—, mientras que la geometría de la red, al condicionar explícitamente en el bloque distributivo de partida, ofrece una estimación puntual ligada a la curvatura local específica de la economía argentina.

4.4 Análisis de sensibilidad: la robustez aparente del índice lineal

Una objeción natural a la crítica del enfoque lineal es que los índices compuestos suelen someterse a análisis de sensibilidad de sus ponderaciones, lo cual debería, en principio, exponer su fragilidad si esta existiera. El Cuadro 6 reproduce un ejercicio de este tipo: se recalculó el IDJ+BM de cuatro países bajo tres esquemas de ponderación entre el componente económico (IDJ) y el de bienestar (IBM) —un esquema base (IDJ 40% / IBM 60% repartido en cuatro dimensiones), uno que sobrepondera el componente económico (IDJ 50%) y uno que sobrepondera el bienestar (IDJ 30%).

Cuadro 6. Análisis de sensibilidad de las ponderaciones del IDJ+BM

País	IDJ+BM (Base)	Ranking (Base)	IDJ+BM (IDJ +10pp)	Ranking	IDJ+BM (IDJ -10pp)	Ranking
Suiza	0,684	1	0,698	1	0,669	1
Países Bajos	0,583	6	0,568	6	0,600	4
España	0,475	20	0,440	20	0,501	16
Brasil	0,334	38	0,309	40	0,363	36

Elaboración propia a partir de Giuseppe (2024).

El resultado —deliberadamente paradójico para los fines de este artículo— es que el índice lineal **sí es razonablemente robusto** ante variaciones moderadas de sus ponderaciones: el ranking de Suiza no se altera, y los desplazamientos de España y Brasil son menores a cuatro posiciones. Esta robustez, sin embargo, es **engañosa**, y su análisis cuidadoso refuerza, en lugar de debilitar, el argumento central de este artículo: la estabilidad del ranking ante el cambio de ponderaciones solo demuestra que el promedio aritmético es internamente consistente consigo mismo, no que capture el riesgo estructural relevante. Estados Unidos y Alemania —los casos de la paradoja de la soberanía documentada en la sección 4.2— mantendrían su posición «PADI Alta» bajo cualquiera de los tres esquemas de ponderación del Cuadro 6, puesto que ninguno de ellos modifica la estructura aditiva del índice: la fragilidad de su Robustez Soberana seguiría diluida entre las nueve variables restantes, sin importar cuánto se ajuste el peso relativo del componente económico frente al de bienestar. La robustez de un índice lineal ante sus propios supuestos de ponderación no constituye, en consecuencia, evidencia de que dicho índice capture correctamente el riesgo de cola; constituye, en el mejor de los casos, evidencia de que el índice es internamente coherente con una arquitectura —la suma ponderada— que la sección 2.3 de este artículo argumenta que es la fuente misma del problema.

5. Discusión: implicaciones para la solución de modelos macroeconómicos

5.1 La aceleración no lineal del riesgo: evidencia complementaria

Para precisar, con un ejercicio cuantitativo adicional, en qué medida un modelo lineal distorsiona el diagnóstico de riesgo, se calculó la pendiente marginal de la probabilidad de insolvencia del Cuadro 2 (sección 3.1) entre cada par consecutivo de umbrales distributivos —50%→42%, 42%→34%, y 34% hacia el valor promedio observado del bloque PPDI ($\approx 28\%$)—, utilizando el promedio de los estados de desempleo bajo y alto en cada bloque.

Cuadro 7. Pendiente marginal del riesgo de insolvencia por tramo distributivo

Transición de umbral	Δ Probabilidad de insolvencia	Δ RE% (puntos)	Pendiente marginal (pp riesgo / pp RE%)
PADI $\rightarrow$ PMDI (50% $\rightarrow$ 42%)	+0,27	8	0,034
PMDI $\rightarrow$ PBDI (42% $\rightarrow$ 34%)	+0,30	8	0,038
PBDI $\rightarrow$ PPDI (34% $\rightarrow$ ~28%)	+0,35	6	0,058

Cálculos propios a partir de las probabilidades promedio (bajo/alto desempleo) del Cuadro 2.

El resultado es elocuente: la pendiente marginal del riesgo —el aumento de la probabilidad de insolvencia por cada punto porcentual adicional de pérdida de RE%— **no es constante**. Se incrementa en un 70% entre el primer tramo (0,034) y el último (0,058), confirmando la convexidad postulada en la Proposición 2 del primer documento de esta serie. Un modelo lineal único, calibrado sobre el conjunto del rango de RE% observado, produciría necesariamente un coeficiente promedio —del orden de 0,04— que **subestimaría** el riesgo marginal real en la zona PPDI (donde el verdadero valor es 45% más alto que el promedio estimado) y **sobreestimaría** el riesgo en la zona PADI (donde el verdadero valor es 18% más bajo). Esta asimetría de error no es un defecto menor de calibración: es la consecuencia matemática necesaria de imponer una pendiente constante sobre una superficie de probabilidad que la propia teoría —y los datos del Cuadro 2— describen como convexa por tramos.

5.2 Más allá de Blanchard-Kahn: hacia una variedad de silla probabilística

La sección 2.1 documentó que el método de Blanchard-Kahn entrega una única trayectoria de silla determinística. La propuesta de este artículo no es descartar dicho método para los regímenes en los que es válido —economías estables, próximas a un único estado estacionario, sujetas a choques pequeños—, sino reconocer que, fuera de ese dominio de validez, la pregunta relevante deja de ser «¿cuál es la trayectoria de ajuste?» para convertirse en «¿cuál es la **distribución de probabilidad** sobre las trayectorias de ajuste plausibles, y cuán dispersa es esa distribución?». El conjunto de cadenas posteriores que produce el motor HMC —lo que podría denominarse, por analogía con la terminología de Blanchard-Kahn, una **variedad de silla probabilística**— sustituye la certeza de una única trayectoria por un mapa de probabilidades sobre el espacio de trayectorias, permitiendo distinguir entre países con baja incertidumbre estructural (cadenas posteriores concentradas, propias de los regímenes PADI) y países con alta incertidumbre estructural (cadenas posteriores dispersas o bimodales, propias de los regímenes de transición PBDI-PPDI).

5.3 Límites y precauciones epistemológicas

La honestidad académica exige precisar el estatus de la evidencia presentada en la sección 4. Las Tablas de Probabilidad Condicional de los Cuadros 1 y 2, y las probabilidades posteriores del Cuadro 5, constituyen una **especificación piloto** del modelo, elaborada combinando la evidencia disponible para 73 países con juicio teórico informado por la literatura postkeynesiana y de sistemas complejos. No son, en su forma actual, el resultado de una estimación bayesiana formal ejecutada mediante un lenguaje de programación probabilística (Stan, PyMC, NumPyro) sobre un panel de datos de profundidad temporal suficiente, con los diagnósticos de convergencia (estadístico R-hat, tamaño efectivo de muestra, divergencias del muestreador NUTS) que dicha estimación exigiría.

Esta precisión no invalida la arquitectura conceptual propuesta —la sustitución de la suma lineal por la red causal condicional, y de la linealización de Blanchard-Kahn por la exploración hamiltoniana de la posterior—, pero sí exige matizar el lenguaje con el que se comunican sus resultados. Expresiones como «equilibrio estadístico irrefutable», presentes en formulaciones preliminares de esta línea de investigación, exceden lo que cualquier ejercicio bayesiano —formal o piloto— puede legítimamente afirmar: toda inferencia bayesiana es tan confiable como sus *priors* y su verosimilitud, y todo resultado posterior debe presentarse junto con un análisis de sensibilidad de dichos *priors*, no como un hecho consumado. La agenda de investigación que cierra este artículo recoge explícitamente esta exigencia.

6. Conclusiones y agenda de investigación

Este artículo desarrolló el segundo pilar metodológico de la Macroeconomía Dinámica de la Complejidad Distributiva: la sustitución del instrumental de solución lineal-gaussiano —la linealización de Blanchard-Kahn, la ecuación de Euler resuelta como punto fijo determinístico y la suma ponderada de indicadores— por un instrumental de **geometría de probabilidad**, compuesto por Redes de Creencias Bayesianas que modelan la estructura causal condicional del sistema, y el Monte Carlo Hamiltoniano con su muestreador NUTS, que explora la distribución posterior de los estados del sistema mediante el gradiente de su función de verosimilitud.

La evidencia aplicada a un conjunto de diez países documentó tres resultados sustantivos. Primero, el ranking lineal del IDJ+BM oculta una **paradoja de soberanía**: economías que encabezan el ranking aritmético (Estados Unidos, Alemania) exhiben probabilidades posteriores de insolvencia estructural superiores al 75%, invisibles para el promedio pero explícitas en la red causal. Segundo, el experimento contrafactual del Delta de Autonomía mostró que un aumento de apenas 3,3 puntos porcentuales en la participación salarial de Argentina reduciría su probabilidad de insolvencia en 24 puntos, una estimación condicionada a la curvatura local del sistema que un coeficiente lineal promedio no puede replicar con la misma precisión. Tercero, el

análisis de sensibilidad de las ponderaciones reveló que la robustez del índice lineal ante el cambio de sus propios pesos es una robustez aparente: no protege contra la dilución del riesgo de cola, que es precisamente el fenómeno que la arquitectura bayesiana está diseñada para revelar.

La conexión con el primer documento de esta serie es directa: la prima de entropía distributiva $\Omega(\text{RE}\%, \text{RS})$ que endogeniza el Costo de Uso del Capital encuentra en el gradiente hamiltoniano $\nabla U(\beta)$ su contraparte computacional natural, ya que ambas funciones miden, desde marcos formales distintos, la misma magnitud económica: la distancia del sistema respecto de su configuración de mínima fricción distributiva.

Quedan abiertas, como agenda de investigación inmediata, al menos cuatro tareas. Primero, la **implementación formal** del modelo en un lenguaje de programación probabilística (Stan o PyMC), con especificación explícita de *priors* débilmente informativos y verificación de convergencia mediante diagnósticos estándar (R-hat, tamaño efectivo de muestra, ausencia de divergencias del muestreador). Segundo, la **estimación sobre panel extenso**, ampliando la profundidad temporal de la matriz IDJ+BM más allá de los dos puntos (2021, 2024) utilizados hasta ahora, condición necesaria para una inferencia robusta de las Tablas de Probabilidad Condicional. Tercero, un ejercicio de **validación cruzada y verificación predictiva posterior** (*posterior predictive checks*), que contraste las proyecciones del modelo hacia 2030 con la trayectoria efectivamente observada de los países de la muestra a medida que dichos datos se vuelvan disponibles. Cuarto, la **comparación formal de desempeño predictivo** entre el modelo de Blanchard-Kahn linealizado y el modelo HMC/BBN sobre los mismos episodios históricos de choque —hiperinflación argentina, colapso venezolano, desaceleración inmobiliaria china—, de manera que la superioridad metodológica aquí argumentada en términos teóricos pueda finalmente cuantificarse en términos de error de pronóstico fuera de muestra.

En síntesis, este trabajo sostiene que la elección del instrumental matemático no es neutral respecto del diagnóstico económico que produce: un sistema gobernado por umbrales, regímenes y dependencias condicionales exige un instrumental de geometría de probabilidad, no de aproximación lineal. Adoptar ese instrumental no es un refinamiento técnico secundario, sino una condición de posibilidad para que la Macroeconomía Dinámica de la Complejidad Distributiva cumpla su promesa: medir la soberanía real de las naciones, y no solamente su apariencia aritmética.

Referencias

- Blanchard, O. J., & Kahn, C. M. (1980). The solution of linear difference models under rational expectations. *Econometrica*, 48(5), 1305-1311.
- Capra, F., & Luisi, P. L. (2014). *The systems view of life: A unifying vision*. Cambridge University Press.
- Arthur, W. B. (2014). *Complexity and the economy*. Oxford University Press.
- Gelman, A., Carlin, J. B., Stern, H. S., Dunson, D. B., Vehtari, A., & Rubin, D. B. (2013). *Bayesian data analysis* (3rd ed.). CRC Press.
- Giussepe, A. (2024). *Distribución de los ingresos y beneficios desde una perspectiva sistémica-compleja* [Tesis doctoral]. Facultad de Ciencias Económicas y Sociales (FACES-CEAP), Universidad Central de Venezuela.
- Giussepe, A. (2026). Endogenización de la restricción de inversión y el costo de uso del capital: hacia una Macroeconomía Dinámica de la Complejidad Distributiva. Documento de Trabajo MDCD N.º 1. Poli-data.com.
- Hoffman, M. D., & Gelman, A. (2014). The No-U-Turn Sampler: Adaptively setting path lengths in Hamiltonian Monte Carlo. *Journal of Machine Learning Research*, 15(1), 1593-1623.
- Lucas, R. E. (1976). Econometric policy evaluation: A critique. *Carnegie-Rochester Conference Series on Public Policy*, 1, 19-46.
- Neal, R. M. (2011). MCMC using Hamiltonian dynamics. En S. Brooks, A. Gelman, G. Jones, & X.-L. Meng (Eds.), *Handbook of Markov Chain Monte Carlo* (pp. 113-162). CRC Press.
- Pearl, J. (2009). *Causality: Models, reasoning, and inference* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Woodford, M. (2003). *Interest and prices: Foundations of a theory of monetary policy*. Princeton University Press.
- Datos estadísticos de la matriz IDJ+BM (73 países, 2021-2024): Banco Mundial, Fondo Monetario Internacional, Eurostat, Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Naciones Unidas (UNSTAT, UNDESA), Organización Internacional del Trabajo (ILOSTAT) y bancos centrales/institutos nacionales de estadística. Cálculos propios sobre la base de Giussepe (2024).