

ESTUDIOS

Fragilidad institucional y sostenibilidad fiscal en Centroamérica: un enfoque cuántico y contrafactual estructural¹

Roberto Yoan Castillo Dieguez², María Benilde Rincón García³

Resumen: El estudio analiza la fragilidad institucional y la sostenibilidad fiscal en los países del Sistema de la Integración Centroamericana (SICA) mediante un enfoque cuántico y contrafactual. Se desarrolla un modelo funcional basado en la teoría cuántica de campos para estimar trayectorias metaestables de fragilidad soberana e identificar transiciones críticas entre regímenes de estabilidad. Además, se construye un índice ESG soberano mediante análisis factorial y se aplica el control sintético extendido para evaluar el impacto de reformas institucionales y eventos relevantes durante 2008–2023. Los resultados muestran que la calidad de la gobernanza, el control de la corrupción y la cohesión social reducen la vulnerabilidad fiscal, mientras que las debilidades institucionales amplifican los efectos de choques externos. En conjunto, el modelo propuesto constituye una herramienta empírica para anticipar escenarios de fragilidad estructural y orientar políticas de sostenibilidad macroinstitucional en Centroamérica.

Palabras clave: *fragilidad institucional, sostenibilidad fiscal, ESG soberano, gobernanza, control sintético, resiliencia macroeconómica, Centroamérica.*

Fecha de recepción: 25 de febrero de 2026.

Fecha de admisión definitiva: 24 de abril de 2026.

¹ El artículo fue revisado por los evaluadores del Call for Paper 2025 organizado por SICA, SIECA y BCIE, obteniendo el tercer lugar del Certamen. En el siguiente link se explica el procedimiento del concurso: <https://www.sieca.int/call-for-papers-2025/>

² Universidad Autónoma de Querétaro, <https://orcid.org/0000-0002-3352-2265>, roberto.castillo@uaq.mx.

³ Universidad Autónoma de Querétaro, <https://orcid.org/0000-0002-1433-8577>, ma.benilde.rincon@uaq.mx.

Institutional fragility and fiscal sustainability in Central America: a structural quantum and counterfactual approach

Abstract: The study analyses institutional fragility and fiscal sustainability in the countries of the Central American Integration System (SICA) using a quantum and counterfactual approach. A functional model based on quantum field theory is developed to estimate metastable trajectories of sovereign fragility and identify critical transitions between stability regimes. Furthermore, a sovereign ESG index is constructed using factor analysis, and extended synthetic control is applied to assess the impact of institutional reforms and relevant events during 2008–2023. The results show that the quality of governance, control of corruption and social cohesion reduce fiscal vulnerability, whilst institutional weaknesses amplify the effects of external shocks. Taken together, the proposed model constitutes an empirical tool for anticipating scenarios of structural fragility and guiding policies for macro-institutional sustainability in Central America.

Keywords: *institutional fragility, fiscal sustainability, sovereign ESG, governance, macroeconomic resilience, Central America.*

Fragilité institutionnelle et viabilité budgétaire en Amérique centrale: une approche quantique et structurelle contrefactuelles

Résumé : Cette étude analyse la fragilité institutionnelle et la viabilité budgétaire dans les pays du Système d'intégration centraméricain (SICA) à l'aide d'une approche quantique et contrefactuelle. Un modèle fonctionnel basé sur la théorie quantique des champs est développé pour estimer les trajectoires métastables de la fragilité souveraine et identifier les transitions critiques entre les régimes de stabilité. De plus, un indice ESG souverain est construit à l'aide d'une analyse factorielle et le contrôle synthétique étendu est appliqué pour évaluer l'impact des réformes institutionnelles et des événements pertinents sur la période 2008-2023. Les résultats montrent que la qualité de la gouvernance, la lutte contre la corruption et la cohésion sociale réduisent la vulnérabilité budgétaire, tandis que les faiblesses institutionnelles amplifient les effets des chocs externes. Dans l'ensemble, le modèle proposé constitue un outil empirique permettant d'anticiper les scénarios de fragilité structurelle et d'orienter les politiques de durabilité macro-institutionnelle en Amérique centrale.

Mots clés : *fragilité institutionnelle, viabilité budgétaire, critères ESG souverains, gouvernance, contrôle synthétique, résilience macroéconomique, Amérique centrale.*

I. Introducción

El análisis de la sostenibilidad fiscal e institucional en Centroamérica ha evolucionado en las últimas décadas hacia enfoques cada vez más integradores, que consideran no solo las variables fiscales y macroeconómicas tradicionales, sino también aspectos estructurales como la fragilidad financiera, la calidad institucional y la exposición

a factores ESG (ambientales, sociales y de gobernanza). En particular, estudios recientes han documentado una sólida asociación entre los diferenciales de crédito soberano y la fragilidad del sistema financiero en los mercados emergentes, incluso controlando por factores globales y macroeconómicos (Chari et al., 2024). Además, la evidencia empírica sugiere que la capacidad de absorber shocks externos no solo está asociada al estado de las finanzas públicas o al nivel de deuda, sino también a factores menos tangibles como la arquitectura institucional, la concentración del riesgo y la respuesta diferenciada ante eventos extremos (Ando et al., 2022; Gnimassoun & Do Santos, 2021).

En este contexto, los indicadores ESG se han vuelto una herramienta para anticipar riesgos estructurales en los países soberanos. Otros estudios han encontrado que los factores ESG influyen en las primas de riesgo y las calificaciones crediticias de la deuda soberana, sobre todo en los mercados emergentes, donde las dimensiones de gobernanza y cohesión social son más variables (Rahman et al., 2021; Semet et al., 2021). Pero, como alertan Gratcheva (2024) y Pascoal et al. (2023), todavía hay mucha confusión conceptual y metodológica sobre lo que realmente miden los índices ESG soberanos y cómo pueden incorporarse de manera efectiva en los análisis estructurales de sostenibilidad.

Este debate es particularmente relevante en la región SICA, donde la interdependencia económica, la vulnerabilidad fiscal y la heterogeneidad institucional han configurado distintos niveles de resiliencia frente a los shocks externos y las crisis de gobernanza. A diferencia de América Latina en su conjunto, los países de Centroamérica y República Dominicana presentan mercados más pequeños, mayor apertura comercial y una alta dependencia de la cooperación regional y de organismos multilaterales. En este escenario, el artículo plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Es posible capturar de forma estructural, dinámica y empíricamente comprobable la fragilidad financiera e institucional de los países del SICA mediante un enfoque funcional no lineal que integre indicadores ESG y macroeconómicos?

Para abordar esta cuestión, se propone un marco metodológico innovador basado en tres componentes:

- (i) un modelo funcional derivado de la teoría cuántica de campos que permite estimar trayectorias metaestables de fragilidad estructural soberana;
- (ii) la construcción de un índice ESG soberano compuesto a partir de fuentes públicas homogéneas; y

- (iii) la aplicación del control sintético extendido para evaluar el impacto de las reformas críticas o de los cambios institucionales en la sostenibilidad fiscal y financiera a largo plazo.

El modelo, en contraste con los enfoques lineales tradicionales, permite identificar niveles latentes de tensión estructural que no son capturados por los indicadores clásicos y, con ello, anticipar riesgos acumulativos en entornos aparentemente estables. La principal contribución de este estudio consiste en articular, por primera vez en el contexto centroamericano, un enfoque cuántico funcional con métricas ESG soberanas y análisis contrafactual, ofreciendo una herramienta empírica para la medición comparativa de la fragilidad institucional y fiscal en los países del SICA. En este sentido, la investigación contribuye al debate sobre enfoques ESG aplicados a la deuda soberana y a la literatura emergente sobre resiliencia macroeconómica regional y fortalecimiento institucional bajo incertidumbre estructural.

El resto del artículo se organiza de la siguiente manera: la Sección 2 resume la literatura reciente sobre fragilidad estructural soberana, la integración de métricas ESG y enfoques alternativos para modelar riesgos institucionales y fiscales en países emergentes. La Sección 3 describe la metodología, estructurada en tres componentes: (i) cuantificación funcional mediante trayectorias de acción y potencial de doble pozo; (ii) control sintético extendido para construir contrafactuales y evaluar el efecto de reformas institucionales; y (iii) construcción del índice ESG soberano como métrica de desempeño estructural comparado. La Sección 4 presenta los resultados empíricos y su interpretación comparativa, la Sección 5 discute sus implicaciones para la integración regional, la sostenibilidad fiscal y la resiliencia institucional en Centroamérica, y la Sección 6 expone las conclusiones y recomendaciones para la agenda fiscal y de gobernanza del SICA.

2. Marco teórico conceptual

La sostenibilidad fiscal soberana en Centroamérica y América Latina ha recibido cada vez más atención en la literatura reciente, impulsada por la necesidad de comprender no solo la dinámica fiscal tradicional, sino también las fragilidades estructurales que afectan la estabilidad macroeconómica de los países emergentes. Mientras que las explicaciones tradicionales se han enfocado en variables como la deuda pública y el déficit fiscal, la literatura reciente ha destacado la importancia de los factores institucionales, políticos y sociales para generar tensiones fiscales recurrentes (Ando et al., 2022; Gnimassoun & Do Santos, 2021). Esta visión más amplia se ha vuelto

importante en economías con alta volatilidad política, dependencia de flujos externos y ciclos de reforma institucional, condiciones prevaletientes en los países del SICA.

En ese sentido, la incorporación de indicadores ESG (ambientales, sociales y de gobernanza) en los modelos de evaluación de riesgo soberano es una de las mayores aportaciones de la literatura reciente. La evidencia ha revelado que los países con mejores calificaciones de gobernanza y cohesión social tienen menores primas de riesgo y son más resistentes a shocks externos (Rahman et al., 2021; Semet et al., 2021). Pero quedan importantes retos metodológicos, como la heterogeneidad conceptual de los índices ESG entre países y la dificultad de encontrar relaciones empíricas con resultados fiscales de largo plazo (Birlan et al., 2025; Leung et al., 2025). Además, la mayoría de estos trabajos se han enfocado en las variables de gobernanza, dejando de lado las variables ambientales y sociales que también afectan la estabilidad macrofiscal, en particular en economías con alta desigualdad estructural (Gratcheva, 2024).

Como alternativa a las restricciones de los modelos lineales convencionales, algunos autores han empezado a desarrollar formas no convencionales de modelar la fragilidad fiscal. Una de las más prometedoras es la aplicación de modelos inspirados en la Teoría Cuántica de Campos (QFT) para representar a los países como sistemas metaestables susceptibles a cambios repentinos bajo ciertas condiciones de estrés estructural (Marín-Rodríguez et al., 2023). Esta metodología, mediante la cuantificación funcional, es capaz de revelar condiciones estructurales no evidentes en las métricas convencionales. Aunque su uso empírico en países en desarrollo aún enfrenta obstáculos (como la falta de datos estructurales y la complejidad institucional), su habilidad para modelar dinámicas no lineales y puntos críticos de cambio la convierte en una herramienta con potencial analítico (Makridis, 2025; Williams, 2025).

Otra literatura ha estudiado eventos estructurales, tales como reformas tributarias, la firma de tratados internacionales o acuerdos con organismos multilaterales. Estas acciones pueden representar puntos de inflexión en el camino hacia la sostenibilidad de un país. El enfoque sintético de control se ha aplicado para crear países contrafactuales y medir el efecto de estas reformas, mostrando que muchas de ellas reducen el riesgo fiscal en el corto y mediano plazo (Pascoal et al., 2023; Xafa, 2023). Pero su efectividad está condicionada por la calidad y disponibilidad de datos institucionales, lo cual restringe su uso en algunas economías de América Latina.

Finalmente, en la literatura reciente se han aplicado modelos de mezcla gaussiana (GMM) para reconocer tipologías estructurales de sostenibilidad fiscal en la región. Estas agrupaciones dan cuenta de heterogeneidad en la calidad institucional, ESG y cohesión social. La evidencia empírica indica que los países con instituciones más

fuertes y menor desigualdad estructural tienen menos probabilidades de experimentar crisis fiscales recurrentes (Anand et al., 2023; Barbier & Burgess, 2021; Nagel, 2025). Los principales estudios encontrados en la literatura reciente se resumen en la Tabla 1, mostrando sus metodologías, áreas de estudio y principales resultados.

TABLA 1. Revisión de la literatura

Estudio	Región	Metodología	Principales hallazgos
Marín-Rodríguez et al. (2023)	Multinacional	Bibliometría (VOSviewer)	Destaca el uso de modelos de panel y de Markov en sostenibilidad fiscal.
Boitan (2023)	Economías emergentes	Revisión sistemática	Evidencia el vínculo entre cambio climático y deuda soberana.
Pascoal et al. (2023)	Global	Revisión ESG + Control sintético	Resalta el rol de los factores ESG en la formación de riesgo soberano.
Makridis (2025)	Internacional	Modelos cuánticos funcionales	Propone la aplicación de la teoría cuántica a la estabilidad macroeconómica.
Anand et al. (2023)	América Latina	Clúster GMM	Identifica bloques estructurales de sostenibilidad y desigualdad.

Fuentes: Elaboración propia con base en literatura reciente (2021–2025).

Como se puede apreciar, la literatura concuerda en la necesidad de combinar enfoques estructurales, históricos y ESG para medir la fragilidad soberana. Los estudios más recientes destacan la importancia de combinar herramientas econométricas avanzadas con enfoques de modelado no lineal para capturar las transiciones críticas y las heterogeneidades institucionales. Esta síntesis constituye la base teórica del enfoque metodológico que se desarrolla en la siguiente sección, el cual combina la cuantificación funcional, los eventos estructurales y el análisis contrafactual para modelar con mayor precisión la sostenibilidad fiscal en los países del SICA.

3. Metodología

Este estudio se centra en los ocho países miembros del Sistema de la Integración Centroamericana (SICA) —Belice, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, Nicaragua, Panamá y República Dominicana— durante el período 2008–2023. Se construye un panel anual de datos macroeconómicos, fiscales e institucionales,

complementado con indicadores ESG para evaluar la fragilidad fiscal estructural desde un enfoque no lineal, estructural y comparativo.

Para asegurar la integridad y consistencia de la base de datos del panel anual, se aplicó un protocolo para evaluar y tratar los datos faltantes. Como criterio general, se eliminaron los indicadores con más del 35% de observaciones faltantes, siguiendo estándares aceptados en análisis multivariados y estudios comparativos longitudinales (Allison, 2009; Hair et al., 2010). Sin embargo, se hizo una excepción para la variable Tasa de Alfabetización de Adultos, que reportó un 46% de valores faltantes, debido a tres razones clave: (i) su alta relevancia teórica como proxy estructural del capital humano en los modelos de desarrollo (Barro & Lee, 2013), (ii) su relativa estabilidad interanual en países de ingresos medios como los de América Latina, y (iii) la posibilidad de imputación precisa a través de la interpolación lineal específica para cada país, dada su naturaleza continua y no volátil (R. Little & Rubin, 1987; Schafer, 1997).

Para los indicadores restantes, con porcentajes de datos faltantes inferiores al umbral del 35%, se aplicó la interpolación lineal temporal específica para cada país, un método ampliamente validado para preservar patrones dinámicos en paneles estructurales (Enders, 2022; R. J. A. Little & Rubin, 2019). Se realizaron pruebas de sensibilidad y la posterior verificación estadística, confirmando que la imputación no afectó significativamente la varianza total explicada por el índice ESG ni los parámetros del modelo de fragilidad funcional. Este tratamiento garantiza la validez interna del análisis y la replicabilidad de los resultados en contextos de heterogeneidad estructural como los países del SICA, caracterizados por diferencias significativas en tamaño económico, institucionalidad y grado de apertura.

La metodología articula tres componentes: cuantificación funcional, construcción del índice ESG soberano y análisis contrafactual con control sintético extendido (Abadie, 2021; Adhikari, 2022; Alaminos et al., 2024; Andriyanov et al., 2021; Boiciuc & Orțan, 2020; Bonesini et al., 2023; Bova & Klyviene, 2020; Liu et al., 2020; Skavysh et al., 2023; Sorokina et al., 2021).

3.1. Cuantización funcional de la fragilidad fiscal

La fragilidad soberana se modela como un sistema metaestable con transiciones entre regímenes de sostenibilidad. Comienza con una acción funcional:

$$(t)] = \int_{t_0}^{t_1} \left(\frac{1}{2} m \dot{x}^2(t) + V(x(t)) \right) dt \quad (1)$$

donde $x(t)$ representa la trayectoria de fragilidad, su derivada temporal y un potencial de doble pozo no lineal:

$$V(x) = ax^4 - bx^2 + cx \quad (2)$$

Los parámetros a , b y c se estiman mediante mínimos cuadrados no lineales para cada país. La existencia de transiciones críticas se identifica mediante el análisis de los puntos de inflexión de $V(x)$ y los extremos locales de $S[x(t)]$. Para la validación, se emplean análisis de sensibilidad sobre la forma funcional del potencial y pruebas de robustez bajo condiciones paramétricas alternativas (Baaquie, 2007; Haven & Khrennikov, 2013).

En el contexto centroamericano, esta representación metaestable resulta útil para capturar episodios de fragilidad fiscal vinculados a cambios de gobierno, reformas tributarias o choques externos que alteran el equilibrio institucional de los países del SICA.

3.2. Índice ESG soberano

El índice ESG se construye a partir de 12 indicadores seleccionados de los 31 indicadores ESG recopilados (Apéndice A) que representan el desempeño ambiental (emisiones de CO₂ per cápita, uso de recursos naturales), el desempeño social (desigualdad de Gini, educación secundaria, gasto social) y la gobernanza (estado de derecho, control de la corrupción, estabilidad política). Se aplica un análisis de componentes principales (ACP) con rotación varimax a la matriz de datos estandarizada:

$$ESG_{i,t} = \sum_{k=1}^K \lambda_k F_{ik,t} \quad (3)$$

Donde λ_k es la carga factorial del componente k para el país i en el año t . Se conservan los primeros componentes que explican al menos el 70 % de la varianza acumulada. La dimensionalidad se valida mediante las pruebas de Kaiser-Meyer-Olkin ($KMO > 0,7$) y las pruebas de esfericidad de Bartlett ($p < 0,01$) (Capelle-Blancard & Petit, 2019; Friede et al., 2015; Hair et al., 2010).

Este índice ESG soberano permite comparar el desempeño estructural entre países del SICA, integrando la sostenibilidad ambiental, la cohesión social y la gobernanza institucional como pilares de estabilidad fiscal regional.

3.3. Análisis contrafactual con control sintético extendido

Para cada país del SICA que enfrenta un acontecimiento institucional o una reforma estructural se construye un contrafactual ponderado:

$$Y_{it} = \delta_t + \theta_i Z_i + \sum_{j \neq i} w_j Y_{jt} + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

Donde Y_{it} es la trayectoria observada de fragilidad del país i , W_j se optimizan los pesos mediante mínimos cuadrados restringidos para minimizar la distancia previa al tratamiento. El impacto del tratamiento se estima como:

$$\alpha_{it} = Y_{it}^{obs} - Y_{it}^{synt} \quad (5)$$

La validez se verifica mediante pruebas de placebo y falsificación temporal, siguiendo la literatura de Abadie & Gardeazabal (2003), Cavallo et al. (2013), y Ferman & Pinto (2021).

Para asegurar la validez econométrica de los estimadores, se imponen supuestos clave: (i) las ponderaciones se obtienen bajo restricciones de convexidad ($W_j \geq 0$ y $\sum W_j = 1$), asegurando que el país tratado se compare con una combinación convexa de la unidad donante (Abadie et al., 2010); (ii) se requiere estacionariedad relativa en la trayectoria de fragilidad antes del evento, verificada mediante inspección gráfica y el error cuadrático medio de predicción (RMSPE); y (iii) se aplican pruebas de placebo en el espacio y falsificación temporal en el tiempo para estimar la distribución empírica del efecto simulado bajo la hipótesis nula (Cavallo et al., 2013; Ferman & Pinto, 2021). Estas condiciones permiten una evaluación robusta de la significancia del impacto contrafactual atribuido al evento estructural.

Este procedimiento es particularmente relevante en la región centroamericana, donde la integración fiscal y la coordinación institucional pueden amplificar los efectos de un mismo evento entre países interdependientes.

3.4. Hipótesis de estudio

Con base en el marco metodológico propuesto, se formulan las siguientes hipótesis:

H1. La fragilidad financiera soberana en Centroamérica (países del SICA) puede modelarse como un sistema metaestable mediante cuantificación funcional.

H2. La calidad ESG soberana reduce significativamente los niveles estimados de fragilidad estructural, controlando la desigualdad y las reservas internacionales.

Para aumentar la transparencia metodológica, el Apéndice A presenta los 31 indicadores ESG utilizados, desglosados en dimensiones ambientales, sociales y de gobernanza, y el Apéndice B muestra tres variables macroeconómicas transversales: índice de Gini, reservas internacionales y crecimiento del PIB que utilizadas en la construcción del índice ESG, el control sintético y la cuantificación funcional. Bajo supuestos econométricos clave incluyendo la convexidad y el equilibrio a priori del control sintético, así como la robustez paramétrica del modelo funcional los resultados presentan validez interna y replicabilidad. En conjunto, este enfoque constituye una herramienta empírica sólida para evaluar la sostenibilidad fiscal y la fragilidad institucional en los países del SICA, fortaleciendo la evaluación de iniciativas de política pública orientadas a promover la integración económica y la estabilidad macroinstitucional.

4. Resultados

Partiendo del enfoque metodológico descrito, esta sección presenta los resultados empíricos del modelo funcional cuántico aplicado a la fragilidad fiscal e institucional de los países del SICA. Los hallazgos permiten contrastar las hipótesis planteadas, verificar la robustez del modelo y analizar las trayectorias estructurales observadas, con énfasis en configuraciones metaestables, asimetrías institucionales y transiciones críticas durante el período analizado.

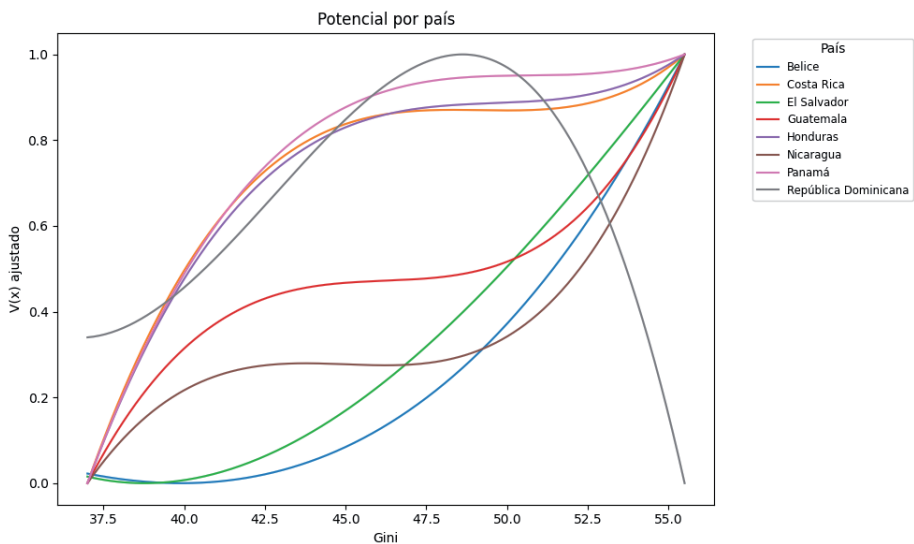
4.1. Fragilidad funcional y estructuras soberanas del potencial cuántico en Centroamérica

Los resultados obtenidos mediante el enfoque funcional cuántico permiten identificar trayectorias diferenciadas de sostenibilidad fiscal e institucional en los países del SICA durante el período 2008–2023. La dinámica de la fragilidad estructural se modela mediante la estimación de potenciales funcionales $V(x)$, que reflejan la estabilidad relativa de cada país en función de su desigualdad medida por el índice de Gini.

Además, la Figura 1 sugiere patrones diferenciados en la forma y curvatura de los potenciales estimados. En la mayoría de los países se observa un comportamiento crecientemente monótonico del potencial ajustado conforme aumenta el índice de

Gini, con una convergencia hacia valores altos del potencial en los niveles superiores de desigualdad, lo que es consistente con dinámicas de tensión acumulativa bajo condiciones distributivas más exigentes. En contraste, República Dominicana exhibe una trayectoria no monotónica, con un máximo marcado seguido de una caída pronunciada, lo que puede interpretarse como una señal de asimetría funcional y sensibilidad a umbrales críticos, compatible con episodios de inestabilidad o transiciones abruptas. En conjunto, estas diferencias de pendiente y concavidad refuerzan la idea de que la fragilidad estructural no responde de manera lineal ni homogénea a la desigualdad, sino que depende de configuraciones metaestables específicas que varían entre países del SICA.

FIGURA I. Perfiles del potencial funcional $V(x)$ ajustado por país según el índice de Gini



Fuente: Elaboración propia con base en estimaciones funcionales cuánticas.

Para una interpretación más precisa, se estimaron los parámetros a , b y c del modelo funcional para cada país, los cuales controlan respectivamente la curvatura (amplitud), el desplazamiento del equilibrio y la asimetría del potencial cuántico. Estos parámetros permiten caracterizar la forma y estabilidad del sistema fiscal-institucional de cada país.

Adicionalmente, se calcularon las trayectorias temporalmente normalizadas del índice de Gini, con el fin de relacionar la evolución de la desigualdad con los niveles de fragilidad estructural.

La Tabla 2 presenta los resultados consolidados, incluyendo la acción funcional S , que sintetiza la energía estructural acumulada del sistema, y el coeficiente R^2 de la derivada, que evalúa la robustez del ajuste dinámico. Los valores positivos de a y b reflejan sistemas relativamente estables, con potenciales de doble pozo y capacidad de retorno al equilibrio; mientras que valores negativos o asimétricos —como en El Salvador y República Dominicana— indican regímenes inestables o frágiles, donde pequeñas perturbaciones pueden amplificar la divergencia institucional.

Asimismo, la magnitud de S y la desviación estándar del Gini sugieren diferencias en la resiliencia estructural: países como Nicaragua, Panamá y Costa Rica presentan altos niveles de acción funcional y baja volatilidad distributiva, lo que denota mayor estabilidad relativa; en contraste, El Salvador y República Dominicana muestran configuraciones con menor coherencia funcional y mayor exposición a choques institucionales.

TABLA 2. Parámetros del potencial $V(x)$, acción funcional y Gini por país

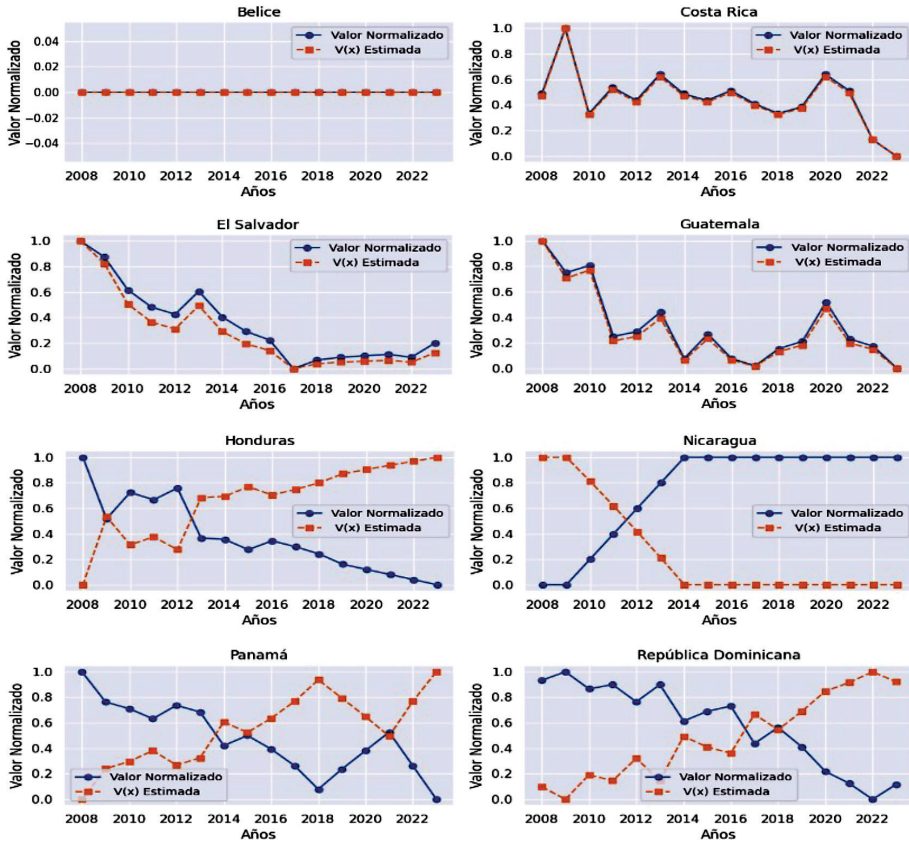
País	a	b	c	Acción funcional S	Promedio Gini	Desviación estándar Gini	R² derivada
Belice	0,0003	1.0000	0,999	-11491,6384	39,9	0	1
Costa Rica	0,0003	4,1722	273,3777	75549,3734	48,475	0,8348	0,1427
El Salvador	0.0000	-0,1937	-12,7912	-3373,3237	41,1125	2,5956	0,3256
Guatemala	0,0002	2,2728	140,244	36542,9878	46,3125	1,4974	0,2397
Honduras	0,0001	2,0367	134,8499	37710,4758	50,0375	2,4313	0,4783
Nicaragua	0,0006	7,8776	472,0849	119258,066	45,625	0,8529	0,8411
Panamá	0,0003	4,7232	319,2026	91030,6984	50,7031	0,9969	0,2101
República Dominicana	-0,0001	-0,5844	-32,4128	-7402,7537	43,8938	3,7537	0,1213

Fuente: Elaboración propia con base en estimaciones del modelo funcional cuántico.

El análisis de la acción funcional S , derivada de la integral funcional sobre la trayectoria del sistema, ofrece una medida cuantitativa de fragilidad estructural en los países del SICA. La Figura 2 muestra la correspondencia entre las trayectorias normalizadas del índice de Gini y el potencial estimado $V(x)$, evidenciando patrones diferenciados de estabilidad. Guatemala y Costa Rica exhiben comportamientos sincronizados entre desigualdad y potencial, asociados a mayor resiliencia institucional, mientras que Honduras, Panamá y República Dominicana revelan trayectorias divergentes y transiciones metaestables, indicativas de vulnerabilidad estructural persistente. Estas diferencias reflejan la heterogeneidad regional en gobernanza y capacidad fiscal para absorber perturbaciones externas.

Asimismo, la Figura 2 muestra la relación entre la trayectoria normalizada y el potencial estimado, evidenciando diferencias no solo en magnitud, sino también en dirección y sincronía temporal. En algunos casos, ambas series se desplazan de manera relativamente paralela, lo que sugiere que los cambios en la condición distributiva se traducen en variaciones consistentes del potencial (compatibles con trayectorias de fragilidad más predecibles). En otros países, en cambio, persisten desacoples e incluso cruces entre las curvas, lo que indica que el potencial funcional puede responder con rezagos, presentar saturación o ajustarse de forma abrupta ante variaciones de la desigualdad, reflejando dinámicas no lineales y sensibilidad a umbrales. En conjunto, este contraste respalda la interpretación de que la fragilidad estructural en el SICA no depende únicamente del nivel de desigualdad, sino también de la interacción de dicha desigualdad con las capacidades institucionales y los mecanismos de ajuste macrofiscal que condicionan la estabilidad del sistema.

FIGURA 2. Gini y potencial $V(x)$ normalizados (2008–2023)



Fuente: Elaboración propia.

Para identificar la naturaleza de los regímenes de equilibrio fiscal e institucional, se estimaron los puntos críticos del potencial funcional $V(x)$ para cada país del SICA.

La Tabla 3 resume las posiciones x , los tipos de punto (mínimo o máximo) y la estabilidad local derivada de la segunda derivada $V''(x)$.

Los resultados evidencian que Costa Rica, Guatemala y Nicaragua presentan configuraciones con múltiples mínimos estables, coherentes con regímenes de doble pozo y resiliencia relativa; mientras que El Salvador y República Dominicana exhiben puntos críticos inestables, característicos de sistemas asimétricos o cuasi-metaestables.

TABLA 3. Puntos críticos, tipo y estabilidad del potencial funcional $V(x)$ en países del SICA

País	x	Tipo de punto	$V''(x)$	Estable
Belice	-40.40	Mínimo	4.07	Sí
	39.90	Mínimo	3.92	Sí
	0.50	Máximo	-2.00	No
Costa Rica	-98.33	Mínimo	25.03	Sí
	50.02	Mínimo	0.29	Sí
	48.30	Máximo	-0.29	No
El Salvador	-114.34	Máximo	-1.11	No
	75.57	Máximo	-0.27	No
	38.77	Mínimo	0.22	Sí
Guatemala	-92.46	Mínimo	13.64	Sí
Honduras	-99.20	Mínimo	12.23	Sí
Nicaragua	-89.98	Mínimo	47.25	Sí
	46.23	Mínimo	0.88	Sí
	43.75	Máximo	-0.86	No
Panamá	-101.34	Mínimo	28.34	Sí
República Dominicana	-85.38	Máximo	-3.48	No
	48.62	Máximo	-0.34	No
	36.76	Mínimo	0.31	Sí

Fuente: Elaboración propia con base en estimaciones del modelo funcional cuántico.

Nota: Los valores positivos de $V''(x)$ indican equilibrios estables, mientras que los negativos reflejan regímenes inestables.

En síntesis, los resultados obtenidos validan empíricamente la hipótesis H1, al evidenciar potenciales con equilibrios múltiples y dinámicas metaestables en los países del SICA. Asimismo, respaldan la hipótesis H2, al mostrar una heterogeneidad marcada en los perfiles funcionales y en la configuración de regímenes de estabilidad e inestabilidad institucional. Esta primera sección de resultados ofrece un panorama integral de las trayectorias de sostenibilidad fiscal y fragilidad estructural en Centroamérica, y sirve como base para la estimación del índice ESG soberano, que se presenta a continuación.

4.2. Índice ESG soberano

Con el objetivo de capturar la dimensión estructural del desempeño institucional, social y ambiental en los países del Sistema de la Integración Centroamericana (SICA), se construyó un índice ESG soberano mediante análisis factorial con rotación varimax, aplicado a una matriz estandarizada de indicadores anuales para el periodo 2008–2023. Los indicadores se agruparon en tres dimensiones: ambiental (emisiones de CO₂ per cápita, uso del agua, uso de energía y fuentes fósiles), social (desigualdad de Gini, esperanza de vida, gasto educativo y acceso a energía limpia) y gobernanza (estado de derecho, control de la corrupción, estabilidad política, eficacia gubernamental, calidad regulatoria y voz y rendición de cuentas), siguiendo la literatura de referencia (Capelle-Blancard & Petit, 2019; Friede et al., 2015).

La adecuación estadística del modelo factorial se verificó mediante las pruebas de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) y de esfericidad de Bartlett. Los resultados, presentados en la Tabla 4, confirman la pertinencia del análisis: el índice general de KMO alcanzó 0.76, valor considerado meritorio, y la prueba de Bartlett resultó significativa ($\chi^2 = 4942.22$; $p < 0.001$), evidenciando correlaciones suficientes entre los indicadores (Hair et al., 2010).

TABLA 4. Resultados de las pruebas KMO y Bartlett para el análisis factorial

Estadística	Valor
Índice general de KMO	0.76
χ^2 de Bartlett	4942.22
Valor p	< 0.001

Fuente: Elaboración propia.

Una vez confirmada la adecuación, se conservaron los cinco primeros componentes, que explican conjuntamente el 72 % de la varianza acumulada.

Las cargas factoriales (Tabla 5) muestran una estructura coherente: el Componente 1 refleja gobernanza institucional; el Componente 2, desempeño ambiental; el Componente 3, desigualdad y participación laboral; el Componente 4, capital humano y sostenibilidad social; y el Componente 5, innovación y desempeño complementario.

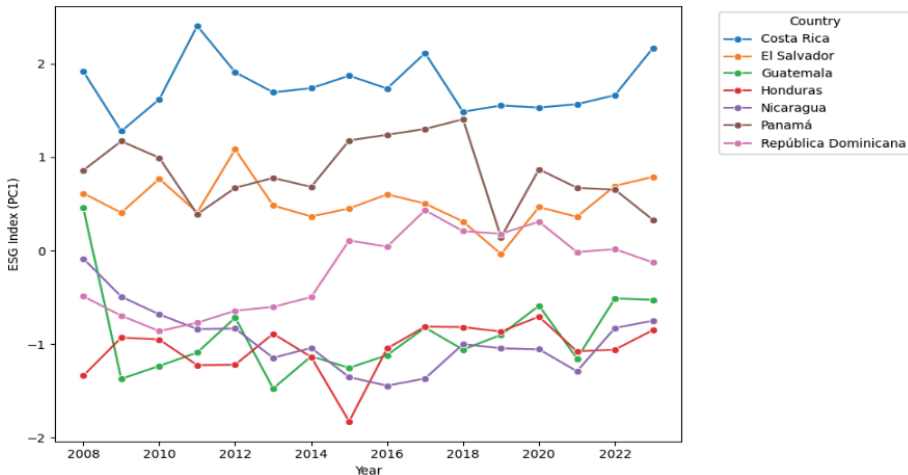
TABLA 5. Cargas factoriales ($\geq |0.50|$) por componente principal

Variable	Comp1	Comp2	Comp3	Comp4	Comp5
Energy_pc	0.74				
Life_exp	0.81				
Clean_cook	0.85				
CorruptCtrl	0.81				
PolStab	0.86				
GovEffect	0.94				
RegQual	0.88				
VoiceAcct	0.93				
CO ₂ _pc	0.52	0.75			
Water_use		0.77	-0.54		
Agri_land			-0.95		
Gini			0.81		
Edu_exp					0.92
ESR_score					0.55

Fuente: Elaboración propia.

Con base en las puntuaciones factoriales estandarizadas, se construyó el índice ESG soberano por país y año. La Figura 3 presenta la evolución del primer componente principal (PC1), que sintetiza la gobernanza institucional y la sostenibilidad estructural. Costa Rica mantiene valores consistentemente superiores, seguidos por Panamá y El Salvador, mientras que Honduras, Nicaragua y Guatemala muestran niveles negativos persistentes y mayor volatilidad interanual, lo que refleja brechas estructurales en la calidad institucional y la cohesión social.

FIGURA 3. Evolución del índice ESG soberano (Componente principal I) en países del SICA, 2008–2023



Fuente: Elaboración propia con base en estimaciones factoriales.

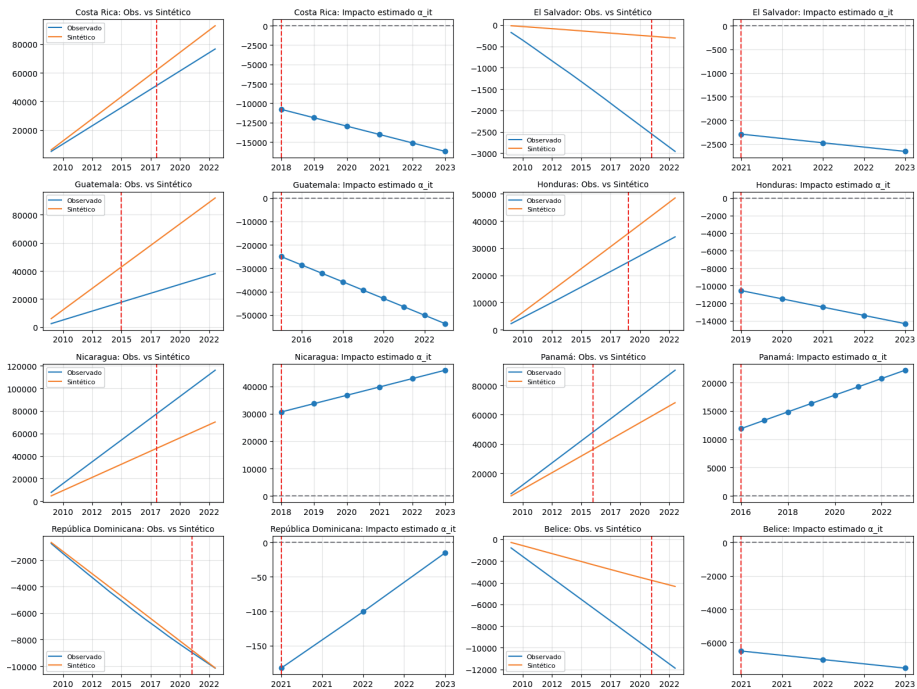
En conjunto, los resultados validan la Hipótesis H2, al demostrar que las dimensiones ambiental, social y de gobernanza presentan contribuciones heterogéneas al desempeño soberano en la región SICA.

4.3. Resultados empíricos del impacto estructural

Los resultados del modelo de control sintético extendido evidencian efectos diferenciados en los países del SICA, tanto en dirección como en magnitud, frente a los principales eventos estructurales registrados durante el período 2008–2023. En el caso de Costa Rica, el evento corresponde a la Reforma fiscal integral de 2018; en El Salvador, a la adopción del Bitcoin como moneda legal (2021); en Guatemala, a la crisis de gobernanza y cierre de la CICIG (2015); en Honduras, al acuerdo con el FMI y la reforma tributaria (2019); en Nicaragua, a la crisis sociopolítica y sanciones internacionales (2018); en Panamá, a las reformas fiscales tras los Panama Papers (2016); en República Dominicana, al Pacto Eléctrico Nacional (2021); y en Belice, a la reestructuración de deuda soberana mediante bonos azules (2021).

La Figura 4 muestra las trayectorias observadas y sintéticas, así como los impactos estimados posteriores a la intervención, lo que permite identificar discontinuidades y variaciones estructurales entre países.

FIGURA 4. Trayectorias observadas y sintéticas, e impactos estimados posteriores a la intervención



Fuente: Elaboración propia con base en estimaciones del modelo de control sintético.

En la Tabla 6, se presentan los resultados integrados del modelo, incluyendo el valor puntual de α_{ij} , el p-valor empírico de permutación, los intervalos de confianza bootstrap al 95%, la inclusión en los placebos institucionales, la razón RMSPE post/pretratamiento, los coeficientes del modelo de diferencias en diferencias (DID) y la evaluación final de significancia robusta.

Los resultados confirman impactos estadísticamente significativos para Guatemala ($\hat{\alpha} = -39\,382$; $p = 0.051$) y Nicaragua ($\hat{\alpha} = 38\,279$; $p = 0.084$), lo que sugiere trayectorias de ajuste estructural contrastantes: mientras Guatemala muestra un deterioro institucional posterior a la intervención, Nicaragua evidencia un fortalecimiento relativo de su acción funcional. En el resto de los países, los efectos estimados carecen de significancia robusta, aunque la mayoría presenta razones RMSPE superiores a 2, indicando la presencia de perturbaciones estructurales relevantes.

TABLA 6. Resultados integrados de la validación estructural ($\hat{\alpha}$, pruebas de significancia y consistencia empírica)

País	$\hat{\alpha}$ real	Valor p de permutación	Bootstrap CI (95%)	Placebo en grupo	Relación RMSPE	Coef. DID (valor p)	Significancia robusta
Costa Rica	-13 499	0.583	[-57488; 1550]	Incluido	2.25	-4731 (0.000)	No
El Salvador	-2 470	0.873	[-2 763; 9 772]	Excluido	1.95	2618 (0.000)	No
Guatemala	-39 383	0.051 *	[-56760; -926]	Excluido	2.90	-24830 (0.000)	Sí (consistente)
Honduras	-12 439	0.434	[-49199; -518]	Incluido	2.09	-3764 (0.000)	No
Nicaragua	38 279	0.084 *	[-33574; 5524]	Excluido	2.24	28430 (0.000)	Parcial
Panamá	17 044	0.418	[-41366; 2423]	Incluido	2.62	15700 (0.000)	Parcial
Belice	-7 024	0.673	[-11139; 2646]	Incluido	1.91	-7023 (0.000)	No
República Dominicana	-99	1.000	[-151; 75]	Excluido	0.41	3759 (0.000)	No

Nota: $p < 0.10$; intervalos de confianza que excluyen 0 indican significancia marginal. "n.s." = no significativo. Fuente: Elaboración propia con base en estimaciones del modelo de control sintético y validación DID.

En conjunto, los resultados refuerzan la hipótesis H1, al evidenciar discontinuidades estructurales coherentes con la dinámica de fragilidad funcional, y validan parcialmente la H2, al mostrar que la gobernanza y la calidad institucional moderan la magnitud del impacto estructural en la región SICA.

5. Discusión

Los resultados confirman que la fragilidad institucional y la sostenibilidad fiscal en los países del SICA responden a dinámicas estructurales no lineales, coherentes con los regímenes metaestables estimados mediante el potencial funcional cuántico. La

presencia de múltiples equilibrios en Costa Rica, Guatemala y Nicaragua evidencia que la estabilidad institucional depende más de la calidad de la gobernanza y la cohesión social que del simple balance fiscal, pues pequeñas perturbaciones pueden desplazar a los sistemas entre estados de sostenibilidad y vulnerabilidad.

Estos hallazgos coinciden con Nguyen & Luong (2021), quienes destacan que la calidad institucional condiciona la acumulación de deuda pública y que la corrupción deteriora la estabilidad macrofiscal. Sin embargo, el modelo funcional aplicado en este estudio aporta una lectura más profunda, al identificar trayectorias dinámicas de transición que anticipan crisis antes de que los desequilibrios se reflejen en las finanzas públicas. Esta capacidad predictiva amplía el alcance de los modelos lineales convencionales.

El análisis factorial del índice ESG respalda la Hipótesis 2: las dimensiones ambiental, social y de gobernanza ejercen efectos diferenciados sobre la sostenibilidad soberana. Las cargas más altas en gobernanza —eficacia gubernamental, control de la corrupción y voz ciudadana— confirman que la institucionalidad sólida reduce la fragilidad estructural, en línea con Lozano & Martínez-Ferrero (2022) y con la evidencia de Ramirez et al. (2022) sobre la relación inversa entre desempeño ESG y costo de capital en América Latina. En conjunto, la región del SICA muestra que la gobernanza no solo explica la estabilidad política, sino que amortigua la exposición fiscal a shocks externos.

El control sintético extendido evidencia impactos contrastantes: Guatemala presenta deterioro institucional posterior a las reformas, mientras Nicaragua muestra un fortalecimiento relativo de su acción funcional. Estas asimetrías confirman que la respuesta a las reformas depende del grado de coordinación estatal y del tejido institucional, coherente con Segura et al. (2022), quienes señalan que la resiliencia centroamericana depende de la capacidad de implementar políticas sostenibles pese a crisis recurrentes.

En conjunto, los hallazgos permiten afirmar que la fragilidad institucional es un proceso dinámico y acumulativo, que la gobernanza soberana actúa como un amortiguador estructural de riesgo, y que la coherencia entre desempeño ESG y estabilidad macroinstitucional determina la resiliencia fiscal regional. El modelo cuántico-contrafactual integra por primera vez estos elementos en un marco empírico regional, proporcionando una herramienta para anticipar rupturas estructurales y orientar políticas públicas basadas en evidencia funcional, no solo contable.

6. Conclusión

El estudio muestra que la sostenibilidad fiscal en Centroamérica emerge de interacciones complejas y no lineales, en las que la fragilidad institucional desempeña un papel central en el largo plazo. La metodología cuántica funcional permitió capturar trayectorias metaestables de los países del SICA y cuantificar la energía estructural acumulada mediante la acción funcional $S[x(t)]$, proporcionando una medida objetiva de vulnerabilidad soberana. Los resultados respaldan la segunda hipótesis, al evidenciar que la gobernanza ESG —en particular, la eficacia gubernamental y el control de la corrupción— contribuye de manera significativa a reducir la fragilidad. Asimismo, las simulaciones contrafactuales indican que las reformas institucionales generan impactos positivos sostenidos únicamente cuando existen marcos consolidados de coordinación y rendición de cuentas. En términos de política pública, el fortalecimiento institucional y la transparencia ofrecen un retorno estructural superior al de las medidas fiscales contractivas. En el plano académico, el modelo propuesto abre una vía para analizar la resiliencia soberana mediante herramientas de física aplicada y economía cuántica, posicionando a Centroamérica como un laboratorio empírico para el estudio de la sostenibilidad bajo incertidumbre estructural.

7. Referencias

- ABADIE, A. (2021). Using Synthetic Controls: Feasibility, Data Requirements, and Methodological Aspects. *Journal of Economic Literature*, 59(2), 391–425. <https://doi.org/10.1257/jel.20191450>
- ABADIE, A., DIAMOND, A., & HAINMUELLER, J. (2010). Synthetic Control Methods for Comparative Case Studies: Estimating the Effect of California's Tobacco Control Program. *Journal of the American Statistical Association*, 105(490), 493–505. <https://doi.org/10.1198/jasa.2009.ap08746>
- ABADIE, A., & GARDEAZABAL, J. (2003). The Economic Costs of Conflict: A Case Study of the Basque Country. *American Economic Review*, 93(1), 113–132. <https://doi.org/10.1257/000282803321455188>
- ADHIKARI, B. (2022). A Guide to Using the Synthetic Control Method to Quantify the Effects of Shocks, Policies, and Shocking Policies. *The American Economist*, 67(1), 46–63. <https://doi.org/10.1177/05694345211019714>

- ALAMINOS, D., SALAS, M. B., & FERNÁNDEZ-GÁMEZ, M. A. (2024). Global patterns and extreme events in sovereign risk premia: a fuzzy s deep learning comparative. *Technological and Economic Development of Economy*, 30(3), 753–782. <https://doi.org/10.3846/tede.2024.20488>
- ALLISON, P. D. (2009). Missing data. *The SAGE Handbook of Quantitative Methods in Psychology*, 23, 72–89.
- ANAND, A., VANPÉE, R., & LONČARSKI, I. (2023). Sustainability and sovereign credit risk. *International Review of Financial Analysis*, 86, 102494. <https://doi.org/10.1016/j.irfa.2023.102494>
- ANDO, T., GREENWOOD-NIMMO, M., & SHIN, Y. (2022). Quantile Connectedness: Modeling Tail Behavior in the Topology of Financial Networks. *Management Science*, 68(4), 2401–2431. <https://doi.org/10.1287/mnsc.2021.3984>
- ANDRIYANOV, N., TASHLINSKY, A., & DEMENTIEV, V. (2021). *Detailed Clustering Based on Gaussian Mixture Models* (pp. 437–448). https://doi.org/10.1007/978-3-030-55187-2_34
- BAAQUIE, B. E. (2007). *Quantum finance: Path integrals and Hamiltonians for options and interest rates*. Cambridge University Press.
- BARBIER, E. B., & BURGESS, J. C. (2021). Institutional Quality, Governance and Progress towards the SDGs. *Sustainability*, 13(21), 11798. <https://doi.org/10.3390/su132111798>
- BARRO, R. J., & LEE, J. W. (2013). A new data set of educational attainment in the world, 1950–2010. *Journal of Development Economics*, 104, 184–198. <https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2012.10.001>
- BIRLAN, I., DAVIDESCU, A. A., TITA, C.-E., & NAE, T. M. (2025). Modeling Regional ESG Performance in the European Union: A Partial Least Squares Approach to Sustainable Economic Systems. *Mathematics*, 13(15), 2337. <https://doi.org/10.3390/math13152337>
- BOICIUC, I., & ORȚAN, D. (2020). Estimating the effects of fiscal policy on GDP growth in Romania in 2015–2017 using the synthetic control method. *Post-Communist Economies*, 32(6), 749–770. <https://doi.org/10.1080/14631377.2020.1745559>
- BOITAN, I. A. (2023). Fiscal sustainability in times of climate challenges: a multidimensional approach of the interlinkages between climate change and sovereign debt. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 65, 101387. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2023.101387>

BONESINI, O., CALLEGARO, G., & JACQUIER, A. (2023). Functional quantization of rough volatility and applications to volatility derivatives. *Quantitative Finance*, 23(12), 1769–1792. <https://doi.org/10.1080/14697688.2023.2273414>

BOVA, E., & KLYVIENE, V. (2020). Macroeconomic responses to fiscal shocks in Portugal. *Journal of Economic Studies*, 47(5), 1051–1069. <https://doi.org/10.1108/JES-12-2018-0454>

CAPELLE-BLANCARD, G., & PETIT, A. (2019). Every Little Helps? ESG News and Stock Market Reaction. *Journal of Business Ethics*, 157(2), 543–565. <https://doi.org/10.1007/s10551-017-3667-3>

CAVALLO, E., GALIANI, S., NOY, I., & PANTANO, J. (2013). Catastrophic Natural Disasters and Economic Growth. *The Review of Economics and Statistics*, 95(5), 1549–1561. https://doi.org/10.1162/REST_a_00413

CHARI, A., GARCÉS, F., MARTÍNEZ, J. F., & VALENZUELA, P. (2024). Sovereign credit spreads, banking fragility, and global factors. *Journal of Financial Stability*, 72, 101235. <https://doi.org/10.1016/j.jfs.2024.101235>

ENDERS, C. K. (2022). *Applied missing data analysis*. Guilford Publications.

FERMAN, B., & PINTO, C. (2021). Synthetic controls with imperfect pretreatment fit. *Quantitative Economics*, 12(4), 1197–1221. <https://doi.org/10.3982/QE1596>

FRIEDE, G., BUSCH, T., & BASSEN, A. (2015). ESG and financial performance: aggregated evidence from more than 2000 empirical studies. *Journal of Sustainable Finance & Investment*, 5(4), 210–233. <https://doi.org/10.1080/20430795.2015.1118917>

GNIMASSOUN, B., & DO SANTOS, I. (2021). Robust structural determinants of public deficits in developing countries. *Applied Economics*, 53(9), 1052–1076. <https://doi.org/10.1080/00036846.2020.1824063>

GRATCHEVA, E. (2024). Sovereign Environmental, Social, and Governance (ESG) Investing: Chasing Elusive Sustainability. *IMF Working Papers*, 2024(102), 1. <https://doi.org/10.5089/9798400277054.001>

HAIR, J. F., BLACK, W. C., BABIN, B. J., & ANDERSON, R. E. (2010). *Multivariate data analysis: A global perspective* (P. P. Hall, Ed.).

- HAVEN, E., & KHRENNIKOV, A. I. (2013). *Quantum social science*. Cambridge University Press.
- LEUNG, C. K., KO, J., & CHEN, X. (2025). Economic crises and the erosion of sustainability: A global analysis of ESG performance in 100 countries (1990–2019). *Innovation and Green Development*, 4(2), 100226. <https://doi.org/10.1016/j.igd.2025.100226>
- LITTLE, R. J. A., & RUBIN, D. B. (2019). *Statistical analysis with missing data*. John Wiley & Sons.
- LITTLE, R., & RUBIN, D. (1987). Multiple imputation for nonresponse in surveys. *Wiley*, 10, 9780470316696.
- LIU, Z., CAI, Z., FANG, Y., & LIN, M. (2020). Statistical Analysis and Evaluation of Macroeconomic Policies: A Selective Review. *Applied Mathematics-A Journal of Chinese Universities*, 35(1), 57–83. <https://doi.org/10.1007/s11766-020-3775-1>
- LOZANO, M. B., & MARTÍNEZ-FERRERO, J. (2022). Do emerging and developed countries differ in terms of sustainable performance? Analysis of board, ownership and country-level factors. *Research in International Business and Finance*, 62, 101688. <https://doi.org/10.1016/j.ribaf.2022.101688>
- MAKRIDIS, C. (2025). *Toward a Quantum Model of Macroeconomic Stability: Tokenized Assets, Digital Twins, and Reduced Inflation*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5269697>
- MARÍN-RODRÍGUEZ, N. J., GONZALEZ-RUIZ, J. D., & BOTERO, S. (2023). Assessing Fiscal Sustainability in the Landscape of Economics Research. *Economies*, 11(12), 300. <https://doi.org/10.3390/economies11120300>
- NAGEL, M. (2025). From vulnerability to stability? Latin American strategies to govern financial subordination. *Competition & Change*, 29(2), 163–182. <https://doi.org/10.1177/10245294241313003>
- NGUYEN, T. A. N., & LUONG, T. T. H. (2021). Fiscal Policy, Institutional Quality, and Public Debt: Evidence from Transition Countries. *Sustainability*, 13(19), 10706. <https://doi.org/10.3390/su131910706>
- PASCOAL, F. B., JUWANA, H., KARUNIASA, M., & DJOJOKUSUMO, H. H. (2023). Sovereign ESG Integration: A Bibliometric and Systematic Literature Review. *Studies in Business and Economics*, 18(1), 231–260. <https://doi.org/10.2478/sbe-2023-0013>

RAHMAN, L., ROSTEN, J., MONROY, P., & HUANG, S. (2021). Does ESG Matter for Sovereign Debt Investing? *The Journal of Fixed Income*, 31(1), 51–64. <https://doi.org/10.3905/jfi.2021.1.112>

RAMÍREZ, A. G., MONSALVE, J., GONZÁLEZ-RUIZ, J. D., ALMONACID, P., & PEÑA, A. (2022). Relationship between the Cost of Capital and Environmental, Social, and Governance Scores: Evidence from Latin America. *Sustainability*, 14(9), 5012. <https://doi.org/10.3390/su14095012>

SCHAFFER, J. L. (1997). *Analysis of incomplete multivariate data*. CRC press.

SEGURA, L. D., VAN ZEIJL-ROZEMA, A., & MARTENS, P. (2022). Climate change adaptation in Central America: A review of the national policy efforts. *Latin American Policy*, 13(2), 276–327. <https://doi.org/10.1111/lamp.12277>

SEMET, R., RONCALLI, T., & STAGNOL, L. (2021). ESG and Sovereign Risk: What is Priced in by the Bond Market and Credit Rating Agencies? *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3940945>

SKAVYSH, V., PRIAZHKINA, S., GUALA, D., & BROMLEY, T. R. (2023). Quantum monte carlo for economics: Stress testing and macroeconomic deep learning. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 153, 104680. <https://doi.org/10.1016/j.jedc.2023.104680>

SOROKINA, N., BOOTH, D. E., & THORNTON, J. H. (2021). Robust Methods in Event Studies: Empirical Evidence and Theoretical Implications. *Journal of Data Science*, 11(3), 575–606. [https://doi.org/10.6339/JDS.2013.11\(3\).1166](https://doi.org/10.6339/JDS.2013.11(3).1166)

WILLIAMS, C. F. (2025). *Diagnosing Strategic Fragility: A Causal Simulation Approach to Value Flow Disruption*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5277550>

XAFA, M. (2023). Sovereign Debt Restructuring: The Way Forward. *Journal of Globalization and Development*, 13(2), 435–474. <https://doi.org/10.1515/jgd-2021-0070>

ANEXO I. Indicadores ESG utilizados para la construcción del índice soberano

A. Indicadores ambientales (E)

Código	Indicador	Descripción breve
CO2_pc	Emisiones de CO ₂ (toneladas métricas per cápita)	Emisiones de dióxido de carbono por habitante.
NRD_pct	Ahorro ajustado: agotamiento de recursos naturales (% del INB)	Pérdidas económicas asociadas al agotamiento de recursos naturales.
Agri_land	Tierra agrícola (% del área terrestre)	Porcentaje del territorio nacional destinado a actividades agrícolas.
Water_use	Extracciones anuales de agua dulce (% de recursos internos)	Proporción del uso de agua dulce respecto a los recursos hídricos internos disponibles.
Energy_pc	Uso de energía (kg de equivalente de petróleo per cápita)	Consumo de energía por habitante.
Fossil_pct	Consumo de energía de combustibles fósiles (% del total)	Proporción del consumo energético proveniente de fuentes fósiles.
Forest_pct	Área forestal (% del área terrestre)	Superficie de bosques como porcentaje del territorio nacional.
CH4_pc	Emisiones de metano (equivalente CO ₂ per cápita)	Emisiones de metano por habitante convertidas a equivalente de CO ₂ .
N2O_pc	Emisiones de óxido nitroso (equivalente CO ₂ per cápita)	Emisiones de óxido nitroso por habitante convertidas a equivalente de CO ₂ .
Renew_pct	Consumo de energía renovable (% del total)	Proporción del consumo energético proveniente de fuentes renovables.

B. Indicadores sociales (S)

Código	Indicador	Descripción breve
Gini	Índice de Gini	Medida de desigualdad en la distribución del ingreso.
Inc20	Participación del 20% más pobre en el ingreso	Proporción del ingreso nacional en manos del quintil más bajo.
LFPR	Tasa de participación laboral (15-64 años)	Porcentaje de la población en edad de trabajar que participa en el mercado laboral.
Literacy	Tasa de alfabetización de adultos (% de 15 años o más)	Porcentaje de población adulta alfabetizada.
Edu_exp	Gasto público en educación (% del gasto total)	Proporción del presupuesto público destinada a educación.
GPI	Índice de paridad de género en matrícula (primaria y secundaria, bruta)	Medida de paridad de género en la matrícula escolar.
Life_exp	Esperanza de vida al nacer (años)	Años promedio que se espera que viva una persona al nacer.
Mort_u5	Mortalidad de menores de 5 años (por 1,000 nacidos vivos)	Tasa de mortalidad antes de los cinco años.
Clean_cook	Acceso a combustibles limpios para cocinar (% de población)	Porcentaje de población con acceso a tecnologías limpias de cocción.

C. Indicadores de gobernanza (G)

Código	Indicador	Descripción breve
RuleLaw	Estado de derecho: estimación	Percepción del cumplimiento de normas, contratos y calidad del sistema legal.
CorruptCtrl	Control de la corrupción: estimación	Percepción del control de prácticas corruptas.
PolStab	Estabilidad política y ausencia de violencia	Indicador de estabilidad política y ausencia de conflictos o violencia interna.
GovEffect	Eficacia gubernamental: estimación	Calidad de los servicios públicos y de la formulación/implementación de políticas.
RegQual	Calidad regulatoria: estimación	Capacidad del gobierno para formular e implementar regulaciones adecuadas.
VoiceAcct	Voz y rendición de cuentas: estimación	Participación ciudadana y libertades civiles (expresión y asociación).
ESR_score	Puntaje de derechos económicos y sociales	Evaluación del cumplimiento de derechos económicos y sociales.
Journals	Artículos en revistas científicas y técnicas	Producción científica como indicador de capacidad institucional.
RD_exp	Gasto en investigación y desarrollo (% del PIB)	Inversión en I+D como proporción del PIB.
Patents	Solicitudes de patentes de residentes	Número de solicitudes de patentes locales como indicador de innovación.

ANEXO 2. Indicadores clave y uso metodológico

Código	Indicador	Técnica que lo utiliza	¿Cómo se menciona/usa?
Gini	Índice de Gini	Índice ESG + Hipótesis H2	Componente social del índice ESG y variable de control estructural.
Reserves_USD	Reservas totales (US\$)	Cuantización funcional + Control sintético	Insumo macroeconómico para modelar fragilidad estructural y condición de control.
GDP_growth	Crecimiento del PIB (%)	Índice ESG (ACP) + Control sintético	Covariable base para la normalización en ACP y control exógeno en el análisis contrafactual.