



Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales

Condiciones de cooperación en sistemas multipolares: un enfoque de la teoría de juegos de riesgo geopolítico aplicado al Indo-Pacífico

ID de la propiedad: 202100670

Resumen

Este trabajo aborda la cuestión de bajo qué condiciones puede mantenerse la cooperación entre grandes potencias cuando el entorno internacional es persistentemente inestable, tomando el Indo-Pacífico como caso de referencia por ser una región donde la rivalidad estratégica entre Estados Unidos y China convive con una profunda interdependencia económica y con actores intermedios, Japón, India y Australia, cuyas decisiones condicionan el equilibrio regional.

Como método de análisis para responderla, se construye un modelo de simulación basado en el dilema del prisionero repetido, alimentado con datos reales del Índice de Riesgo Geopolítico (GPR) de Caldara & Iacoviello (2022). El GPR actúa en el modelo como una fricción donde en periodos de mayor tensión, aumenta la probabilidad de que un actor tome decisiones defensivas, aunque su estrategia le indique cooperar. Se comparan dos estrategias clásicas de la teoría de juegos. La primera, Tit-for-Tat (TFT), replica sin excepción la última acción del adversario. La segunda, Generous Tit-for-Tat (GTFT), introduce un margen de perdón que consiste en que, aunque el otro haya fallado, coopera con cierta probabilidad en lugar de responder automáticamente con represalia. Los resultados son contundentes. TFT colapsa de forma irreversible hacia la no cooperación generalizada. Una primera defección accidental desencadena una espiral de represalias de la que el sistema no puede escapar. GTFT, en cambio, sostiene una tasa de cooperación media del 77,7% a lo largo de todo el periodo analizado, incluso en los momentos de mayor tensión geopolítica. La diferencia entre ambas estrategias no es cuánto riesgo soporta cada una, sino si su mecanismo de respuesta tiene margen para perdonar una defección antes de convertirla en represalia: TFT no lo tiene y colapsa; GTFT sí, y sobrevive.

En el análisis temporal exploratorio no se encuentra una relación lineal significativa entre la defección en un periodo y la variación del riesgo en el siguiente. Este resultado es coherente con el tratamiento del GPR como variable exógena en el modelo, aunque no lo demuestra. Que la correlación sea baja no descarta que esa dependencia exista. Si existiera, se manifestaría a través de crisis repentinas como el 11-S o la invasión de Ucrania, no subiendo gradualmente mes a mes, y ese tipo de saltos bruscos son invisibles para una correlación lineal.

Palabras clave

Cooperación internacional, teoría de juegos, dilema del prisionero repetido, Tit-for-Tat, riesgo geopolítico, Indo-Pacífico, multipolaridad, interdependencia asimétrica.

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	3
ÍNDICE DE TABLAS.....	3
1. INTRODUCCIÓN.....	4
1.1 FINALIDAD, MOTIVACIONES Y OBJETIVOS.....	4
1.2 ESTRUCTURA.....	5
2. MARCO TEÓRICO	6
2.1 COOPERACIÓN BAJO ANARQUÍA Y TEORÍA DE JUEGOS	6
2.2 RECIPROCIDAD, FRAGILIDAD Y TOLERANCIA ESTRATÉGICA: APLICACIONES EN LAS RELACIONES INTERNACIONALES	7
2.3 RIESGO GEOPOLÍTICO, INCERTIDUMBRE Y DINÁMICA TEMPORAL	10
2.4 INTERDEPENDENCIA Y COOPERACIÓN ECONÓMICA EN SISTEMAS MULTIPOLARES.....	11
2.5 EL INDO-PACÍFICO COMO LABORATORIO MULTIPOLAR	14
3. METODOLOGÍA	16
3.1 JUSTIFICACIÓN DEL ENFOQUE METODOLÓGICO	17
3.2 DATOS Y CONSTRUCCIÓN DEL ENTORNO DE RIESGO	17
3.3 ESTRUCTURA DEL JUEGO Y RECOMPENSAS	18
3.4 ESTRATEGIAS IMPLEMENTADAS.....	18
3.5 INCORPORACIÓN DEL RIESGO GEOPOLÍTICO.....	19
3.6 DIMENSIÓN TEMPORAL, CONTAGIO DE RIESGO Y ANÁLISIS EXPLORATORIO	19
4. RESULTADOS.....	20
4.1 SIMULACIÓN TFT: COMPORTAMIENTO INICIAL Y DINÁMICA TEMPORAL.....	21
4.2 SIMULACIÓN GTFT: COMPORTAMIENTO INICIAL Y DINÁMICA TEMPORAL.....	23
4.3 COMPARACIÓN TFT VS. GTFT	25
4.4 ANÁLISIS EXPLORATORIO TEMPORAL: DEFECCIÓN, RIESGO DE CONTAGIO Y ESCALADA PERCIBIDA.....	28
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	30
6. CONCLUSIONES.....	31
PRINCIPALES LIMITACIONES E INVESTIGACIONES FUTURAS	33
BIBLIOGRAFÍA.....	35
ANEXOS	37
ANEXO 1: ANÁLISIS DE ROBUSTEZ.....	37
ANEXO 2: DECLARACIÓN DE USO DE HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL GENERATIVA.....	38
ANEXO 3: CÓDIGO DE ANÁLISIS CUANTITATIVO.....	39

ÍNDICE DE FIGURAS

- **Figura 1.** Evolución de la tasa de cooperación simulada bajo la estrategia Tit-for-Tat (TFT) con fricción por riesgo geopolítico ($RISK_WEIGHT = 0,35$). Periodo: enero 1990 – presente. La línea discontinua indica la media (0,033).
- **Figura 2.** Simulación de control bajo TFT con $RISK_WEIGHT = 0$.
- **Figura 3.** Evolución de la tasa de cooperación simulada bajo la estrategia Generous Tit-for-Tat (GTFT) con fricción por riesgo geopolítico ($RISK_WEIGHT = 0,35$; $FORGIVENESS = 0,25$). Periodo: enero 1990 – presente. La línea discontinua indica la media (0,777).
- **Figura 4.** Comparación de la tasa de cooperación simulada bajo TFT y GTFT con fricción por riesgo geopolítico ($RISK_WEIGHT = 0,35$). Periodo: enero 1990 – presente.
- **Figura 5.** Tasa de cooperación bajo GTFT y riesgo geopolítico medio normalizado del sistema (1990–presente). El eje izquierdo recoge la tasa de cooperación (línea roja); el eje derecho, el GPR medio normalizado de los cinco países (línea gris).
- **Figura 6.** Relación entre la tasa de defección simulada en el periodo t y la variación del riesgo geopolítico medio (ΔGPR) en el periodo $t+1$, bajo TFT (panel izquierdo) y GTFT (panel derecho). Los valores de correlación se indican en el título de cada panel.
- **Figura 7.** Análisis de robustez: cooperación simulada bajo TFT y GTFT para tres niveles de riesgo geopolítico ($RISK_WEIGHT = 0,15; 0,35; 0,60$). $FORGIVENESS = 0,25$. Periodo: enero 1990 – presente.

ÍNDICE DE TABLAS

- **Tabla 1.** Estadísticos descriptivos de la tasa de cooperación simulada ($RISK_WEIGHT = 0,35$; $FORGIVENESS = 0,25$). La columna corr (def_t, ΔGPR_{t+1}) recoge la correlación exploratoria entre la tasa de defección en el periodo t y la variación del GPR agregado en $t+1$.
- **Tabla 2.** Correlaciones exploratorias entre defección simulada y riesgo geopolítico.
- **Tabla 3.** Análisis de robustez: sensibilidad de la cooperación al parámetro $RISK_WEIGHT$.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Finalidad, motivaciones y objetivos

El sistema internacional ha transitado de la estructura bipolar de la Guerra Fría, relativamente estable en su lógica de disuasión mutua, a un periodo de unipolaridad estadounidense y, desde la década de 2010, a un escenario multipolar emergente más complejo. Esta transición hacia la multipolaridad ha incrementado la dificultad de explicar cómo y en qué condiciones puede sostenerse la cooperación en un entorno donde la rivalidad estratégica, la interdependencia económica y la incertidumbre estructural coexisten de forma permanente (Waltz, 1979; Mearsheimer, 2001).

El Indo-Pacífico es un caso paradigmático de esta dinámica. La región concentra la competencia estratégica entre Estados Unidos y China, integrando a actores intermediarios como Japón, India y Australia, cuyas decisiones influyen significativamente en el equilibrio regional (Medcalf, 2020; Christensen, 2015). A esto se suma un alto nivel de interdependencia económica que, aunque crea incentivos para evitar colapsos totales, no elimina necesariamente la competencia. La cooperación y la rivalidad no son fenómenos excluyentes, sino dimensiones simultáneas de un equilibrio inestable (Keohane y Nye, 1977).

En este contexto, el presente trabajo plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿qué condiciones permiten mantener patrones de cooperación en un sistema multipolar caracterizado por un entorno persistente de incertidumbre geopolítica?

Para responder a esta pregunta, se emplea un enfoque de teoría de juegos basado en el dilema repetido del prisionero, incorporando estrategias recíprocas como Tit-for-Tat (TFT) y Generous Tit-for-Tat (GTFT) (Axelrod, 1984). Para ello, se introduce una medida empírica del entorno de riesgo geopolítico mediante el Índice de Riesgo Geopolítico (GPR). En el modelo, este índice no cambia directamente la estructura de pagos del juego, sino que aumenta la probabilidad de desviación estratégica en contextos de mayor tensión (Caldara & Iacoviello, 2022).

A partir de este marco, el trabajo formula tres hipótesis de investigación:

- **H1:** en un entorno de riesgo geopolítico persistente, la estrategia TFT colapsará hacia la no cooperación generalizada debido a su incapacidad para absorber defecciones accidentales inducidas por el riesgo.

- **H2:** la estrategia GTFT mantendrá niveles de cooperación sustantivos y sostenidos en el mismo entorno, gracias a su mecanismo de perdón, que interrumpe las espirales de represalia antes de que se vuelvan irreversibles.
- **H3:** no existirá una relación lineal significativa entre la tasa de defección en un periodo (t) y la variación del riesgo geopolítico en el periodo siguiente (t+1), ($H_0: \rho(\text{defección}_t, \Delta\text{GPR}_{t+1}) = 0$). A diferencia de H1 y H2, esta hipótesis adopta la forma de una hipótesis nula. El modelo trata el GPR como variable exógena por lo que el riesgo condiciona el comportamiento estratégico de los agentes, pero las decisiones de estos no retroalimentan el índice. Por tanto, la defección en t no debería predecir variaciones en el riesgo en t+1. La ausencia de correlación significativa sería un resultado coherente con la lógica del modelo y teóricamente informativo en sí mismo.

Este enfoque permite analizar hasta qué punto se puede mantener la cooperación cuando el entorno internacional se vuelve más inestable y, en particular, si estrategias más tolerantes como el GTFT son más fuertes ante episodios de tensión que pueden desencadenar patrones persistentes de castigo mutuo (Nowak y Sigmund, 1992; Bendor, Kramer, & Stout, 1991). Además, el trabajo presta atención a la dimensión temporal de la interacción internacional, explorando si las variaciones en el comportamiento estratégico durante un periodo (t) están asociadas con cambios en el entorno de riesgo en el periodo siguiente (t+1), en línea con una perspectiva exploratoria sobre las posibles dinámicas de la escalada percibida (Fearon, 1998).

1.2 Estructura

El trabajo se organiza de la siguiente manera. El capítulo 2 desarrolla el marco teórico en cinco bloques: la lógica de la cooperación bajo anarquía y su formalización en el dilema del prisionero, los mecanismos de reciprocidad y tolerancia estratégica con aplicaciones en relaciones internacionales, el papel del riesgo geopolítico como condicionante del comportamiento estratégico, la relación entre interdependencia económica y cooperación en sistemas multipolares, y la justificación del Indo-Pacífico como caso de referencia. El capítulo 3 presenta la metodología: los datos utilizados, la estructura del juego y sus parámetros, las dos estrategias implementadas, la incorporación del GPR como fricción probabilística y el diseño del análisis exploratorio temporal. El capítulo 4 presenta los resultados de las simulaciones organizados en cuatro bloques: el comportamiento de TFT, el de GTFT, su comparación directa y el análisis exploratorio temporal. El capítulo 5 discute los resultados en relación con la literatura y evalúa las tres hipótesis

planteadas. Las conclusiones sintetizan los principales resultados, identifican las limitaciones del modelo y proponen líneas de investigación futuras.

2. MARCO TEÓRICO

El análisis de la cooperación en sistemas multipolares requiere la integración de tres dimensiones fundamentales: **(1)** incentivos estratégicos bajo anarquía, **(2)** mecanismos de reciprocidad en juegos repetidos y **(3)** el papel del entorno estructural, incluyendo la interdependencia económica y el riesgo geopolítico, en la estabilidad cooperativa (Axelrod y Keohane, 1985). Este marco nos permite situar el análisis desarrollado en este trabajo en la intersección entre la teoría de juegos y la teoría de las relaciones internacionales, reuniendo tanto sus fundamentos clásicos como sus desarrollos contemporáneos.

2.1 Cooperación bajo anarquía y teoría de juegos

En ausencia de una autoridad central que garantice el cumplimiento de compromisos, los Estados interactúan en un entorno anárquico donde la cooperación depende de las expectativas, la reputación y la credibilidad (Waltz, 1979; Powell, 1999). El dilema del prisionero sintetiza esta tensión central: aunque la cooperación mutua es colectivamente óptima, cada actor se enfrenta a incentivos individuales para desviarse si anticipa beneficios a corto plazo (Fudenberg y Tirole, 1991).

La estructura formal del juego establece una jerarquía de pagos $T > R > P > S$, donde T (*temptation*) representa la tentación de defeccionar unilateralmente, R (*reward*) es el beneficio de la cooperación mutua, P (*punishment*) el castigo por la defección mutua y S el pago de la parte cooperadora que es traicionada o *sucker's payoff*¹. Esta estructura capta la tensión fundamental entre la racionalidad individual y la eficiencia colectiva que caracteriza gran parte de la interacción internacional (Fudenberg y Maskin, 1986). Cuando la interacción se repite, la lógica estratégica se modifica sustancialmente. Axelrod y Keohane (1985) muestran que la cooperación bajo anarquía puede apoyarse mediante estrategias condicionales que vinculan el comportamiento presente con las acciones pasadas de otros actores. En este contexto, la reciprocidad actúa como un mecanismo informal de cumplimiento, ya que la falta de cooperación conlleva costes futuros en forma de represalias o pérdida de confianza. Según el teorema popular de los juegos repetidos

¹ Los valores $T = 5$, $R = 3$, $P = 1$, $S = 0$ son la especificación estándar de Axelrod (1984). Existen variantes en la literatura que usan estos valores y otras con $T = 4$, $R = 3$, $P = 2$, $S = 1$. Los resultados cualitativos del modelo no dependen de la elección concreta de valores siempre que se mantenga la jerarquía $T > R > P > S$.

(Folk Theorem), la cooperación puede convertirse en una estrategia racional cuando los actores valoran suficientemente el futuro: formalmente, cuando el factor de descuento (δ), que mide cuánto peso da un actor a los pagos futuros frente a los presentes, es lo suficientemente próximo a 1 (Fudenberg y Maskin, 1986). Este resultado teórico es el fundamento que justifica analizar la cooperación como equilibrio sostenible en las interacciones repetidas entre los actores del Indo-Pacífico. Este trabajo no calibra δ explícitamente, sino que incorpora el rango temporal a través de la repetición indefinida de la interacción (Fudenberg y Maskin, 1986). Esta elección implica una limitación ya que, sin una estimación del factor de descuento efectivo de cada actor, no es posible verificar formalmente si las condiciones del Folk Theorem se cumplen en el modelo. Los resultados deben interpretarse, por tanto, no como una demostración de que la cooperación es un equilibrio racional para estos actores concretos, sino como una exploración de qué estrategias son más fuertes ante perturbaciones exógenas en un entorno de interacción repetida.

Es importante señalar que la falta de calibración del δ asume implícitamente un horizonte temporal infinito. En la práctica política, factores como los ciclos electorales o las crisis de liquidez pueden reducir drásticamente el valor de δ , incentivando la defección a corto plazo. En tales escenarios, incluso estrategias resilientes como GTFT podrían volverse inestables si los actores descuentan el futuro a una tasa superior al beneficio esperado del perdón.

La cooperación bajo anarquía ha sido objeto de debate entre las principales tradiciones teóricas de las relaciones internacionales. Basándose en el realismo neoclásico, Mearsheimer (2001) sostiene que las grandes potencias desconfían estructuralmente de sus rivales y priorizan las ganancias relativas de seguridad sobre las ganancias absolutas, lo que restringe la cooperación a aquellos acuerdos en los que ningún actor mejora su posición relativa a costa del otro (lógica de suma no-cero), y la hace frágil ante cualquier cambio en el equilibrio de poder entre las partes. Esta perspectiva contrasta con el institucionalismo liberal de Keohane (1984), quien destaca el papel de los regímenes internacionales en la reducción de costes de transacción, el aumento de la transparencia y la ampliación del rango temporal de los actores, facilitando así la aparición y el mantenimiento de la cooperación incluso entre rivales.

2.2 Reciprocidad, fragilidad y tolerancia estratégica: aplicaciones en las relaciones internacionales

La estrategia TFT es una de las estrategias de reciprocidad más influyentes en la literatura sobre juegos repetidos. Su lógica es sencilla: empezar cooperando y, posteriormente, reproducir la

acción del otro actor del periodo anterior. TFT combina claridad, proporcionalidad y disuasión, lo que explica su éxito en los torneos informáticos organizados por Axelrod (1984), donde superó a estrategias mucho más complejas. El interés de TFT en las relaciones internacionales no es solo analítico: la estrategia capta la lógica de muchas instituciones y prácticas diplomáticas reales. Axelrod y Keohane (1985) documentan cómo la reciprocidad condicional estructura el comportamiento estatal en una amplia variedad de regímenes internacionales, desde acuerdos comerciales hasta control de armas. La idea central es que un Estado coopera mientras el otro coopera, y penaliza la defección de manera proporcional y visible, generando un mecanismo de aplicación descentralizado.

En el ámbito del control de armamentos, la lógica de las TFT es especialmente visible. Durante la Guerra Fría, las negociaciones SALT I (1972) y SALT II (1979) entre Estados Unidos y la Unión Soviética se estructuraron bajo el principio de reciprocidad verificable, es decir, cada concesión en capacidades ofensivas estaba condicionada a concesiones equivalentes del adversario, y cualquier violación detectada amenazaba con desencadenar una respuesta simétrica. Oye (1986) aborda esta dinámica y sostiene que la sostenibilidad de los acuerdos de control de armas depende precisamente de su capacidad para codificar mecanismos recíprocos creíbles. De manera similar, el Tratado INF (1987) introdujo regímenes de inspección mutua precisamente para reducir la incertidumbre sobre el cumplimiento y mantener la cooperación ante posibles desviaciones puntuales.

En el ámbito del comercio, el principio de reciprocidad es la base del sistema multilateral de comercio. El Acuerdo General sobre Aranceles Aduaneros y Comercio (GATT) y posteriormente la Organización Mundial del Comercio (OMC) institucionalizaron la reciprocidad como regla central que consiste en que las concesiones arancelarias se negocian bilateral y condicionalmente, y el mecanismo de solución de diferencias permite la aplicación de contramedidas proporcionadas en caso de violación. Bagwell y Staiger (2002) formalizan esta lógica en un modelo de teoría de juegos y demuestran que el principio de reciprocidad entre el GATT y la OMC puede interpretarse como un mecanismo para implementar la cooperación en libre comercio en un entorno de dilema repetido entre gobiernos de prisioneros. Las guerras comerciales contemporáneas, como las iniciadas por la administración Trump a partir de 2018, ilustran perfectamente la lógica de las TFT a través de los aranceles que desencadenan represalias simétricas, con el riesgo de espirales que reducen el bienestar de ambas partes.

En el ámbito de la seguridad regional, la reciprocidad de las TFT también se observa en las relaciones entre China y los países del Indo-Pacífico. La imposición selectiva de barreras comerciales por parte de China sobre los productos australianos en 2020 y 2021, en respuesta a la solicitud de Australia para una investigación independiente sobre el origen de la COVID-19, es un ejemplo paradigmático de represalias de las TFT a nivel de diplomacia económica: una acción hostil percibida desencadenó una respuesta proporcionada y visible, con el objetivo de disuadir comportamientos similares en el futuro (Reilly, 2021). Sin embargo, la literatura ha destacado limitaciones importantes de la TFT en entornos caracterizados por incertidumbre, errores perceptivos o señales ruidosas (Bendor, Kramer y Stout, 1991). En estos contextos, una desviación puntual puede desencadenar una espiral de represalias sostenidas que conducen a una ruptura persistente de la cooperación. Jervis (1978) anticipó este problema describiendo el dilema de seguridad en el que, en los entornos con alta incertidumbre, los comportamientos que no pretenden ser hostiles pueden percibirse como tales, generando dinámicas de escalada indeseables.

La lógica del perdón estratégico encuentra también expresión en episodios concretos de la diplomacia internacional. El gradual relajamiento de las restricciones comerciales chinas sobre productos australianos entre 2022 y 2023, a medida que se normalizaban los canales diplomáticos bilaterales, ilustra precisamente este mecanismo. China no mantuvo indefinidamente la represalia ante la mejora de señales por parte de Australia, sino que cooperó con cierta probabilidad a pesar de que el conflicto original no había sido formalmente resuelto (Reilly, 2021). De forma análoga, los mecanismos de consulta previa de la ASEAN y los canales de gestión de crisis del Diálogo de Seguridad Cuadrilateral (Quad) funcionan institucionalmente como márgenes de tolerancia que reducen la probabilidad de que una acción percibida como hostil desencadene una represalia automática antes de que pueda verificarse su intención. En términos formales, estas instituciones operan como un parámetro de generosidad $g > 0$ incorporado en la interacción estratégica regional.

Para abordar este problema, variantes más tolerantes como el Generous Tit-for-Tat (GTFT) introducen un margen de perdón que permite restablecer la cooperación tras episodios aislados de no cooperación (Nowak y Sigmund, 1992, 1993). Formalmente, si el oponente defecciona en t , GTFT coopera con una probabilidad $g > 0$ en $t+1$ (parámetro de generosidad). Nowak y Sigmund (1992) muestran que la GTFT supera evolutivamente a la TFT en poblaciones ruidosas, precisamente porque su mecanismo de perdón previene espirales de castigo mutuo que la TFT no puede evitar.

2.3 Riesgo geopolítico, incertidumbre y dinámica temporal

La cooperación internacional no depende exclusivamente de los incentivos materiales definidos por la estructura del juego, sino también del entorno de riesgo percibido en el que operan los actores. En contextos de altas tensiones geopolíticas, los Estados pueden adoptar un comportamiento más defensivo incluso cuando la cooperación sería mutuamente beneficiosa, por miedo a ser explotados o a comprometer su posición relativa de seguridad (Jervis, 1978; Powell, 1999).

El Índice de Riesgo Geopolítico (GPR), desarrollado por Caldara & Iacoviello (2022), mide la intensidad de la cobertura mediática asociada a tensiones, amenazas y conflictos geopolíticos. Se construye mediante análisis textual automatizado aplicado a un corpus de diez grandes periódicos internacionales en inglés, identificando la frecuencia de términos asociados a riesgo geopolítico en relación con el volumen total de noticias. Esto le permite captar cambios en la percepción del riesgo con alta frecuencia temporal (mensual) y amplia cobertura geográfica. El índice presenta, no obstante, limitaciones reconocidas por los propios autores: la identificación de la percepción mediática y no riesgo objetivo; puede estar sesgado hacia eventos de alta visibilidad en prensa anglosajona; y no distingue entre tensiones que escalan a conflicto y aquellas que se resuelven diplomáticamente (Caldara & Iacoviello, 2022). En el contexto de este trabajo, estas limitaciones son parcialmente atenuadas por el tratamiento del GPR como fricción probabilística, no como medida directa de conflicto, y por su normalización en el rango $[0,1]$.

La evidencia empírica disponible sugiere que el riesgo geopolítico tiene efectos significativos en el comportamiento económico y estratégico de los actores. Caldara & Iacoviello (2022) documentan que el aumento del GPR está asociado a reducciones de inversiones, contracciones en el comercio bilateral y una mayor volatilidad en los mercados financieros. Antonakakis et al. (2017) amplían este análisis al mercado de materias primas, mostrando que el riesgo geopolítico afecta a los precios del petróleo y a los mercados bursátiles.

Un aspecto especialmente relevante para este análisis es la dimensión temporal del riesgo geopolítico. La cuestión de si las acciones políticas de un actor en un periodo (t) tienen un impacto en el nivel de riesgo percibido por el otro actor en el periodo siguiente ($t+1$), y si un aumento del riesgo en un país provoca un aumento del riesgo en sus homólogos en el periodo siguiente, es teóricamente plausible pero empíricamente compleja. Desde un punto de vista teórico (Schelling, 1960; Fearon, 1995), las acciones percibidas como hostiles o signos de desestabilización pueden aumentar la percepción de amenaza del adversario, incrementando su GPR y generando dinámicas

de retroalimentación: si A falla y su GPR aumenta, B puede percibir una amenaza mayor, lo que a su vez incrementa su propio GPR, creando una espiral de percepción mutua del riesgo. Sin embargo, la captura empírica de esta dinámica requiere especificaciones que vayan más allá de las simples correlaciones lineales empleadas en este trabajo, lo que justifica que el análisis temporal se considere exploratorio.

En este trabajo, el riesgo geopolítico se conceptualiza como una condición exógena del entorno estratégico. Así, el análisis temporal entre el comportamiento estratégico en un periodo (t) y la variación en el riesgo en ($t+1$) se interpreta como exploratorio, buscando identificar si las variaciones en ambas variables siguen patrones conjuntos compatibles con la dinámica de escalada percibida (Fearon, 1998).

2.4 Interdependencia y cooperación económica en sistemas multipolares

La tradición liberal ha argumentado que la interdependencia económica reduce la probabilidad de conflicto al aumentar los costes de romper relaciones comerciales, generando así incentivos estructurales para mantener la cooperación (Keohane y Nye, 1977; Copeland, 2015). Esta idea, que se remonta a Montesquieu y se articula en el pensamiento kantiano sobre la paz perpetua, tuvo una enorme influencia: la integración comercial europea de posguerra se concibió precisamente como un mecanismo que hacía el conflicto económicamente inviable. Sin embargo, la evidencia empírica sugiere que la relación entre comercio y paz es más contingente y paradójica de lo que sugiere la intuición liberal.

Martin, Mayer y Thoenig (2008) proponen la formalización más rigurosa y empíricamente robusta de esta paradoja. Su argumento central es que la idea convencional de que el comercio fomenta la paz es solo parcialmente cierta, incluso en un modelo donde el comercio es económicamente beneficioso, el conflicto militar reduce el comercio y los líderes son racionales. El punto de partida del modelo es que la guerra ocurre porque las disputas sobre la distribución del excedente en tiempos de paz pueden escalar a conflictos militares cuando la información es asimétrica. Esto es, cada país conoce su propio valor del conflicto, pero no el del rival, lo que puede generar negociaciones que fracasan y conducen a la guerra incluso si ambas partes prefieren la paz en términos absolutos (Martin, Mayer & Thoenig, 2008; Fearon, 1995).

El mecanismo central del modelo se basa en el coste de oportunidad del comercio. Cuando dos países mantienen una intensa relación comercial bilateral, la posibilidad de perder estos flujos en caso de conflicto actúa como fricción disuasoria porque los líderes interiorizan que la guerra

implicaría la destrucción de ganancias específicas de este intercambio bilateral que no podrían recuperarse fácilmente con otros socios. Por esta razón, cuanto mayor es el comercio bilateral, menor es la probabilidad de que una disputa escale hacia un conflicto armado (Martin, Mayer y Thoenig, 2008).

Sin embargo, el efecto de la liberalización multilateral del comercio es exactamente el contrario. Cuando un país está muy integrado en el comercio global y opera con muchos socios, su dependencia específica de un socio bilateral concreto disminuye. La sustitución de socios comerciales se vuelve más fácil, reduciendo el coste de una ruptura bilateral y, por tanto, debilitando el incentivo para hacer concesiones y evitar una escalada. La globalización cambia así la naturaleza de los conflictos: reduce la probabilidad de guerras mundiales, pero aumenta la probabilidad de guerras bilaterales localizadas, precisamente porque reduce las dependencias específicas que disuaden los enfrentamientos bilaterales. Martín, Mayer y Thoenig (2008) verifican empíricamente esta predicción a partir de datos de conflictos militarizados en el periodo 1950-2000, señalando que el efecto es cuantitativamente muy importante para los países vecinos. No obstante, el propio modelo de Martin, Mayer y Thoenig (2008) contiene una limitación importante que los autores reconocen, pero no desarrollan completamente: el argumento bilateral del coste de oportunidad solo es válido cuando los bienes que se comercializan son sustituibles, es decir, cuando la amenaza de interrupción comercial es creíble. Cuando un país es un proveedor cuasi-monopolista de un bien estratégico sin sustitución a corto plazo, la lógica se invierte. En este caso, el proveedor adquiere poder estructural porque la amenaza de interrupción del suministro deja de ser creíble para el comprador, y la amenaza de interrupción se convierte en un instrumento de coacción en manos del proveedor.

El caso del gas natural ruso en Europa ilustra este mecanismo de forma paradigmática. Antes de la invasión de Ucrania en febrero de 2022, Rusia suministraba alrededor del 40-45% del total de las importaciones de gas de la Unión Europea, con países como Alemania, Austria o Eslovaquia contando con porcentajes aún mayores. Esta dependencia extrema hacía que la amenaza europea de cortar el suministro de gas ruso fuera prácticamente inverosímil a corto plazo: la capacidad alternativa era limitada, existían contratos a largo plazo y no existían infraestructuras alternativas (terminales de GNL, nuevas rutas de suministro) disponibles en el horizonte inmediato. Como resultado, Rusia poseía un instrumento de coerción estructural que le permitía anticipar que Europa seguiría comprando gas independientemente de sus acciones militares. Los datos empíricos apoyan firmemente esta lógica. En los primeros tres años de la guerra en Ucrania (2022-2024), la Unión Europea continuó importando decenas de miles de millones de euros de

combustibles fósiles rusos cada año. En el tercer año de la invasión (2024), la UE pagó 21.900² millones de euros por importaciones rusas de combustibles fósiles, una cifra que supera los 18.700 millones de euros en ayuda financiera enviada a Ucrania ese mismo año (CREA, 2025). El gas natural ruso continuó llegando a Europa a través de Ucrania durante toda la guerra, transitando precisamente por el territorio del país invadido hasta que expiró el contrato de tránsito a finales de 2024: en la primera mitad de 2023, el tránsito diario promedió 40 millones de metros cúbicos, equivalentes a unos 15 bcm³ por año (Corbeau, 2023). Países como Austria, Eslovaquia y Hungría, que carecían de alternativas a corto plazo, continuaron recibiendo gas ruso por contrato incluso durante la guerra. Este caso empírico demuestra una limitación fundamental del argumento liberal sobre la interdependencia como factor de paz. Cuando la estructura de dependencia es asimétrica y el bien comercializado no se beneficia de la sustitución a corto plazo, la interdependencia no genera un equilibrio de cooperación mutua, sino una situación de poder estructural en la que el proveedor puede actuar militarmente sin que el comprador pueda aplicar una respuesta comercial creíble. El resultado es una forma extrema de no sustituibilidad bilateral que fortalece, en lugar de limitar, la posición de poder del actor que controla el recurso estratégico.

Esta lógica se reproduce en otros contextos de monopolio o cuasi-monopolio de productos estratégicos sin sustitución a corto plazo. La República Democrática del Congo alberga más del 70% de la producción mundial de cobalto, un mineral esencial para las baterías y equipos electrónicos de vehículos eléctricos. La alta concentración de oferta en un entorno políticamente inestable genera dependencias estructurales similares a las del gas ruso donde los importadores no pueden reemplazar fácilmente la oferta congoleña a corto plazo, lo que limita la credibilidad de sanciones comerciales o represalias económicas por comportamientos considerados inaceptables. En el contexto del Indo-Pacífico, China controla aproximadamente el 60% del refinado mundial de tierras raras, que son esenciales para las industrias de alta tecnología y defensa, lo que también le otorga un poder estructural similar sobre los países importadores de la región (Farrell y Newman, 2019).

Además, Barbieri (1996) y Gartzke (2007) enfatizan que la interdependencia no elimina necesariamente la rivalidad, especialmente cuando existen dependencias asimétricas que confieren poder estructural a ciertos actores. Gartzke (2007) sostiene que es el desarrollo capitalista, y no la interdependencia comercial como tal, lo que reduce la probabilidad de conflicto

² Esta cifra incluye gas natural, petróleo y carbón. El gas natural representó la mayor parte del total. Para desglose por producto y país de destino, véase CREA (2025).

³ *Billion cubic meters*, miles de millones de metros cúbicos.

al alinear transnacionalmente los intereses de las élites económicas. Farrell y Newman (2019) introducen el concepto de interdependencia militarizada para describir cómo las posiciones centrales en las redes económicas globales pueden convertirse en instrumentos de coerción estratégica, formalizando teóricamente el mecanismo ejemplificado por el asunto del gas ruso.

La experiencia reciente del Indo-Pacífico también ilustra cómo la interdependencia económica puede coexistir con la coerción y la rivalidad estratégica. La relación comercial entre China y Australia mencionada anteriormente muestra que, a pesar de una integración comercial significativa, episodios de tensión política han llevado a restricciones selectivas sobre los productos australianos, sin implicar una ruptura total de la relación económica (Reilly, 2021). Según la lógica de Martin, Mayer y Thoenig (2008), esto es coherente con la baja sustituibilidad de algunos flujos comerciales específicos (carbón y cebada australianos en el mercado chino) en comparación con la mayor sustituibilidad de otros, lo que determina que el coste de la coerción es asimétrico. Las cadenas de suministro avanzadas de semiconductores en Asia también ilustran cómo la baja sustituibilidad a corto plazo confiere poder estructural a algunos actores (Farrell y Newman, 2019).

Conviene señalar que el modelo no incorpora esta estructura de interdependencia. Opera con una matriz de pagos simétrica y fija que no parametriza flujos comerciales, sustituibilidad de bienes ni asimetrías de poder estructural. El marco teórico de interdependencia sirve para contextualizar el Indo-Pacífico como entorno de aplicación y para identificar las condiciones bajo las cuales los resultados formales podrían verse limitados en la realidad. Su incorporación explícita al modelo queda como línea de investigación futura.

2.5 El Indo-Pacífico como laboratorio multipolar

El Indo-Pacífico reúne los elementos fundamentales del marco teórico desarrollado, que son la rivalidad estructural entre grandes potencias, las interacciones estratégicas repetidas, las complejas interdependencias económicas y variaciones significativas en el entorno de riesgo geopolítico. La elección de esta región como caso de referencia no es arbitraria, sino que a diferencia de otras regiones con alta conflictividad, el Indo-Pacífico combina multipolaridad activa con al menos cinco actores con capacidad de influencia estratégica autónoma, interdependencia económica profunda en sectores estratégicos sin sustitución a corto plazo, y disponibilidad de datos GPR desagregados por país para todos los actores del modelo. Estas

características hacen de la región un caso de estudio adecuado para analizar bajo qué condiciones la cooperación puede mantenerse o colapsar en sistemas multipolares (Medcalf, 2020; Goh, 2013).

Estructuralmente, el Indo-Pacífico combina la rivalidad hegemónica entre Estados Unidos y China con la presencia de potencias intermedias como Japón, India y Australia, cuyas estrategias de alineación y desalineación influyen decisivamente en la dinámica regional (Goh, 2013). Esta configuración multipolar dificulta la formación de coaliciones estables y aumenta la complejidad de los procesos de cooperación y conflicto. La arquitectura institucional de la región refleja precisamente esta tensión: el Diálogo de Seguridad Cuadrilateral (Quad), que agrupa a Estados Unidos, Japón, India y Australia, opera como un mecanismo de coordinación estratégica frente a China sin constituir una alianza formal, lo que lo convierte funcionalmente en un dispositivo de reciprocidad condicional, es decir, cooperar mientras el otro coopera, análogo a la lógica TFT descrita en la sección anterior. AUKUS, el pacto de seguridad tripartito entre Estados Unidos, Reino Unido y Australia anunciado en 2021, ilustra por su parte cómo las potencias intermedias ajustan sus estrategias de alineación en respuesta a cambios en el entorno de riesgo, en línea con la dinámica de fricción geopolítica que este trabajo modela. La ASEAN, en cambio, institucionaliza una lógica más próxima a GTFT: su principio de no interferencia y sus mecanismos de consulta por consenso incorporan márgenes de tolerancia que reducen la probabilidad de que tensiones bilaterales escalen a rupturas multilaterales.

Desde un punto de vista económico, la región concentra algunas de las cadenas de valor más interdependientes del mundo, con la particularidad destacada por Martin, Mayer y Thoenig (2008) de que una fuerte apertura multilateral puede, paradójicamente, facilitar conflictos bilaterales localizados al reducir la dependencia específica entre pares de países. Al mismo tiempo, la existencia de dependencias estructurales asimétricas sobre bienes estratégicos (semiconductores, tierras raras, minerales críticos) introduce la lógica del monopolio descrita anteriormente, en la que el argumento liberal de la interdependencia como freno al conflicto pierde su validez precisamente en los sectores de mayor relevancia estratégica (Farrell y Newman, 2019). Esta combinación, apertura multilateral que facilita conflictos bilaterales selectivos más dependencias estructurales asimétricas que limitan la credibilidad de las represalias comerciales, hace del Indo-Pacífico un entorno donde las condiciones para el colapso cooperativo descritas en el modelo son especialmente significativas, justificando su elección como caso de referencia.

3. METODOLOGÍA

El objetivo metodológico de este trabajo es analizar las condiciones estratégicas bajo las cuales se puede mantener la cooperación en un sistema multipolar sujeto a un entorno persistente de incertidumbre geopolítica. Para ello, se combina un modelo de simulación inspirado en la teoría de juegos con datos empíricos reales que capturan el nivel de riesgo geopolítico internacional.

Siguiendo la literatura clásica sobre la cooperación bajo anarquía (Keohane, 1984; Axelrod y Keohane, 1985), el análisis se basa en el dilema repetido del prisionero como marco formal para estudiar interacciones estratégicas prolongadas entre Estados. La simulación no pretende predecir los comportamientos específicos de los países analizados, sino explorar la dinámica general de cooperación y no cooperación bajo diferentes supuestos estratégicos (Epstein & Axtell, 1996; Axelrod, 1997).

La simulación se implementa en Python utilizando las librerías pandas y numpy. El modelo se estructura como una función genérica —simulate()— que acepta como argumentos las estrategias (TFT o GTFT), el peso del riesgo (RISK_WEIGHT), el parámetro de generosidad g (FORGIVENESS) y la semilla aleatoria. En cada periodo mensual, la función recorre las 20 parejas direccionales posibles entre los cinco países y determina la acción de cada actor aplicando primero la regla estratégica correspondiente y después la fricción probabilística del GPR. Las decisiones de todos los actores se calculan a partir del estado del periodo anterior antes de actualizar la memoria de interacciones, evitando así dependencias de orden dentro del mismo periodo. Los pagos se acumulan siguiendo la función de utilidad del dilema del prisionero y se registra la tasa de cooperación agregada del sistema, es decir, la proporción de decisiones cooperativas sobre el total de 20 decisiones posibles en cada mes. El sistema inicia con cooperación universal donde todos los actores cooperan en el primer periodo, lo que equivale a un gesto de buena fe antes de que comience la dinámica recíproca. Para garantizar la reproducibilidad de los resultados, se fija una semilla aleatoria global (GLOBAL_SEED = 42)⁴ antes de cada simulación. Las simulaciones principales se ejecutan de forma independiente para TFT y GTFT con la misma semilla, lo que garantiza comparabilidad directa entre estrategias. Además, se realiza un análisis de robustez que replica las simulaciones con valores alternativos

⁴ El valor 42 es arbitrario y convencional en la comunidad de ciencia de datos. Cualquier entero fijo produciría el mismo efecto de reproducibilidad.

de RISK_WEIGHT (0,15; 0,35; 0,60)⁵ manteniendo la misma semilla en todos los casos. El código completo está disponible en el Anexo.

3.1 Justificación del enfoque metodológico

La elección del dilema del prisionero repetido como marco de análisis responde a su capacidad para modelar la tensión entre los incentivos individuales y los beneficios colectivos en entornos de anarquía. Este marco es especialmente adecuado para el Indo-Pacífico, donde la tensión entre incentivos individuales a la defección y los costes colectivos de romper relaciones económicas profundas reproduce con precisión la estructura del dilema del prisionero (Keohane y Nye, 1977; Copeland, 2015).

El uso de simulaciones para el estudio de la cooperación internacional tiene una larga tradición académica, iniciada por los torneos de Axelrod (1984). La innovación de este trabajo es incorporar datos empíricos sobre el riesgo geopolítico como parámetro exógeno en la simulación, uniendo así el modelo formal con el contexto empírico del Indo-Pacífico.

3.2 Datos y construcción del entorno de riesgo

El entorno empírico se modela a partir del Índice de Riesgo Geopolítico (GPR) desarrollado por Caldara & Iacoviello (2022). Se seleccionan cinco países relevantes del Indo-Pacífico: Estados Unidos, China, Japón, India y Australia. La selección responde a dos criterios: la relevancia estratégica para la dinámica regional (los dos actores hegemónicos y las tres potencias intermedias con mayor influencia en el equilibrio del Indo-Pacífico) y disponibilidad de datos GPR desagregados por país con cobertura temporal suficiente. Se utilizan datos mensuales desde enero de 1990, fecha que coincide con el inicio de la serie disponible en Caldara & Iacoviello (2022) y que permite cubrir más de tres décadas de variación geopolítica, incluyendo los principales episodios de tensión identificados en la literatura que son: el periodo post Guerra Fría, el 11-S, la crisis financiera de 2008, las tensiones en el Mar del Sur de China y la guerra de Ucrania.

Los valores de GPR se normalizan en el rango [0, 1] para cada país mediante una transformación min-máx.⁶ Esta elección permite incorporar el riesgo directamente como parámetro probabilístico

⁵ Los tres valores representan fricción baja, media y alta. El objetivo es verificar que los resultados no dependen de haber elegido exactamente 0,35.

⁶ La transformación min-max convierte cada valor de GPR al rango [0,1] mediante la fórmula: $(\text{valor} - \text{mínimo}) / (\text{máximo} - \text{mínimo})$. Un valor de 1,0 indica el máximo histórico de ese país, no un nivel absoluto de riesgo comparable entre países.

en la simulación, pero tiene una implicación relevante: la normalización es relativa al rango histórico de cada país, de modo que un valor de 1,0 en 1991 y en 2022 representan el máximo histórico de cada serie, aunque las magnitudes absolutas de riesgo puedan ser distintas. Este aspecto debe tenerse en cuenta en la interpretación de los resultados.

Cabe precisar que se utiliza específicamente el componente histórico del índice (GPRHC)⁷, que es la serie de mayor cobertura temporal y la empleada por Caldara & Iacoviello (2022) para el análisis de largo plazo. Este componente refleja la percepción mediática acumulada del riesgo geopolítico y no el componente de amenaza en tiempo real, lo que es coherente con el horizonte de análisis mensual del modelo.

3.3 Estructura del juego y recompensas

La interacción entre países se modela como un juego repetido mensual basado en el dilema del prisionero. Los pagos cumplen la condición estándar $T > R > P > S$, con los siguientes valores: $T = 5$ (*temptation*), $R = 3$ (*reward*), $P = 1$ (*punishment*) y $S = 0$ (*sucker's payoff*). Esta estructura se ajusta a la especificación clásica de la literatura (Axelrod, 1984; Fudenberg & Tirole, 1991).

3.4 Estrategias implementadas

Se analizan las dos estrategias de reciprocidad explicadas en secciones anteriores: TFT, de reciprocidad estricta basada en la acción previa del adversario (Axelrod, 1984); y GTFT, una variante tolerante que coopera con una probabilidad $g = 0,25$ ⁸ incluso cuando el oponente falla en el periodo anterior, rompiendo así las espirales de represalia (Nowak y Sigmund, 1992, 1993).

En ambas estrategias, todos los actores cooperan en el primer periodo, lo que equivale a un gesto de buena fe previo al inicio de la dinámica recíproca. Las interacciones son direccionales lo que implica que cada país toma una decisión independiente respecto a cada uno de los otros cuatro, lo que genera 20 decisiones por mes y permite que el comportamiento de un país varíe según con quién interactúa.

⁷ El GPRHC es la versión histórica del índice, construida desde 1900 a partir de archivos de prensa. Se distingue del componente en tiempo real, diseñado para análisis de corto plazo.

⁸ El valor $g = 0,25$ no es arbitrario, sino que se deriva de la estructura de pagos del juego: $g = (R - P) / (T - P) = (3 - 1) / (5 - 1) = 0,25$ (Nowak y Sigmund, 1992). Es el valor que maximiza la cooperación sostenida sin eliminar el incentivo a la reciprocidad.

3.5 Incorporación del riesgo geopolítico

El riesgo geopolítico actúa como una fricción probabilística en las decisiones estratégicas. La probabilidad adicional de defección se define como $p_{\text{defect}} = 0,35 \times \text{GPR_norm}(i, t)$, donde GPR_norm es el valor normalizado del índice para el país i en el periodo t , es una decisión de diseño propia. Esta fórmula se elige por simplicidad: a mayor riesgo, mayor probabilidad de defección, de forma directa y proporcional, sin asumir umbrales ni efectos no lineales. Su validez se verifica indirectamente mediante el análisis de robustez presentado en el Anexo 1.

El parámetro $\text{RISK_WEIGHT} = 0,35^9$ se establece como valor de referencia a partir de dos consideraciones. En primer lugar, debe ser suficientemente alto para que la fricción geopolítica tenga efectos observables sobre la dinámica cooperativa, valores por debajo de 0,10 producirían perturbaciones tan pequeñas que ambas estrategias convergerían a niveles similares de cooperación, eliminando la capacidad discriminante del modelo; en segundo lugar, debe ser suficientemente bajo para que la fricción represente una perturbación real pero no un colapso sistemático garantizado, permitiendo así comparar el comportamiento diferencial de TFT y GTFT ante el mismo entorno de riesgo.

El análisis de robustez verifica que las conclusiones principales se mantienen para valores de RISK_WEIGHT entre 0,15 y 0,60, lo que indica que los resultados no dependen críticamente de esta elección concreta. Este mecanismo no modifica la estructura de incentivos del juego, sino que captura la incertidumbre y las respuestas defensivas características de entornos internacionales inestables (Bendor, Kramer & Stout, 1991; Caldara & Iacoviello, 2022).

3.6 Dimensión temporal, contagio de riesgo y análisis exploratorio

La dimensión temporal de la cooperación internacional plantea una cuestión teóricamente relevante que este trabajo aborda de forma exploratoria: ¿tienen las acciones estratégicas de los actores en un periodo (t) impacto en el nivel de riesgo geopolítico en el periodo siguiente ($t+1$)? Y, como resultado, ¿se extiende un aumento del riesgo geopolítico en un país al nivel de riesgo del país con el que interactúa, generando una dinámica de escalada mutua?

Desde un punto de vista teórico, esta posibilidad es factible. Si un actor defecciona en t , el adversario puede percibir la defección como un signo de mayor hostilidad o un menor compromiso

⁹ La elección de $\text{RISK_WEIGHT} = 0,35$ implica que un país en su máximo histórico de GPR (valor normalizado = 1,0) tiene una probabilidad adicional de defección del 35% en ese periodo. Para un país en su nivel medio de GPR normalizado (~0,3-0,4), la probabilidad adicional oscila entre el 10% y el 14%, lo que representa una perturbación moderada pero consistente a lo largo del tiempo.

con la cooperación, lo que podría resultar en un aumento de su propio nivel de riesgo percibido en $t+1$. Este mecanismo de retroalimentación entre el comportamiento estratégico y la percepción del riesgo constituye la lógica de la escalada. En otras palabras, la UE reacciona a la defección rusa, lo que incrementa el GPR de ambos actores en el periodo siguiente, incrementando a su vez la fricción sobre las decisiones estratégicas del modelo. Schelling (1960) denomina a este tipo de dinámica el eje central de la escalada ya que las señales interpretadas como signos de aumento de la agresión pueden desencadenar respuestas que a su vez se interpretan como nuevas señales hostiles, generando una espiral autorreferencial de tensión percibida.

Sin embargo, el modelo implementado en este trabajo considera el GPR como una variable exógena lo que quiere decir que el riesgo influye en el comportamiento estratégico de los agentes por fricción probabilística, pero no se alimenta de las decisiones de los agentes dentro de la simulación. Esta elección de diseño es deliberada y responde a consideraciones de identificación. Si el GPR fuera endógena para el modelo, sería metodológicamente imposible distinguir si las variaciones en el riesgo son la causa o consecuencia de las variaciones en las tasas de cooperación y defección. La exogeneidad del GPR, por otro lado, permite una interpretación causal clara del canal principal donde un mayor riesgo geopolítico genera más fricción y, por tanto, una mayor probabilidad de defección.

El análisis exploratorio presentado en la Sección 4.4 examina la correlación entre la tasa de defección en t y el cambio en el GPR agregada en $t+1$. Este análisis no establece relaciones causales, sino que busca identificar si las variaciones en ambas variables siguen patrones conjuntos compatibles con la hipótesis de riesgo contagioso o escalada percibida entre actores (Fearon, 1998; Caldara & Iacoviello, 2022). Se espera que esta correlación sea baja o próxima a cero. Un resultado nulo sería coherente con el diseño del modelo en el que el GPR es exógeno respecto a las decisiones de los agentes y reforzaría la validez del canal causal principal, es decir, riesgo a cooperación, y no al revés. Un resultado significativamente positivo, en cambio, apuntaría a la necesidad de tratar el GPR como variable parcialmente endógena en extensiones futuras.

4. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados de las simulaciones. El análisis se organiza en cuatro bloques. Los dos primeros examinan por separado el comportamiento de TFT y GTFT: en cada caso se describe el estado inicial del sistema, los estadísticos descriptivos de la tasa de cooperación y su evolución temporal a lo largo del periodo enero 1990 – presente. El tercer bloque compara directamente ambas estrategias mediante la Tabla 1 y las Figuras 3 y 4, identificando el resultado

central del trabajo. El cuarto bloque presenta el análisis exploratorio temporal sobre la relación entre la tasa de defección en el periodo t y la variación del GPR agregado en $t+1$, con apoyo de la Tabla 2 y la Figura 5. En todos los casos, los resultados se interpretan en relación con el marco teórico del capítulo 2 y con los episodios geopolíticos empíricamente identificados.

4.1 Simulación TFT: comportamiento inicial y dinámica temporal

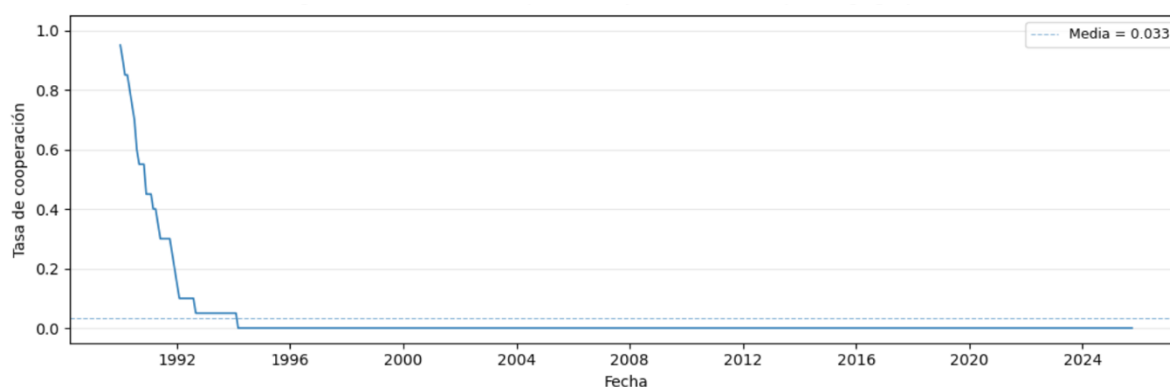
Comportamiento inicial del sistema y distribución de pagos

Los primeros periodos de la simulación bajo TFT muestran niveles elevados de cooperación, con valores de *coop_rate* entre 0,80 y 0,95, coherentes con la apertura cooperativa de la estrategia y con la inicialización en cooperación mutua (Axelrod, 1984). Los pagos son próximos a $R = 3$ para todos los actores, lo que refleja un sistema en equilibrio cooperativo inicial. Sin embargo, ya en estas primeras observaciones aparecen desviaciones puntuales inducidas por la fricción del GPR (Caldara & Iacoviello, 2022), que generan asimetrías de pago. Estos desequilibrios iniciales son el origen del colapso posterior: en un sistema de reciprocidad estricta, una defección accidental activa una respuesta en cadena que el propio mecanismo TFT no puede detener.

Análisis descriptivo de la cooperación bajo TFT

El análisis descriptivo de la tasa de cooperación bajo TFT revela un patrón de colapso estructural con una media de 0,033, mediana de 0,000 y percentil 75 igual a cero, lo que implica que el sistema se encuentra en un estado de no cooperación total durante la mayor parte del tiempo. Aunque se registran valores máximos de hasta 0,95, estos episodios son transitorios y corresponden a los primeros meses de la simulación, antes de que los efectos acumulativos del GPR se propaguen a través del mecanismo de reciprocidad. Este resultado es coherente con las predicciones teóricas para TFT en entornos ruidosos (Bendor, Kramer y Stout, 1991): la estricta reciprocidad genera espirales de represalia irreversibles.

Figura 1. Evolución de la tasa de cooperación simulada bajo la estrategia Tit-for-Tat (TFT) con fricción por riesgo geopolítico ($RISK_WEIGHT = 0,35$). Periodo: enero 1990 – presente. La línea discontinua indica la media (0,033).



Fuente: elaboración propia.

Evolución temporal de la cooperación bajo TFT

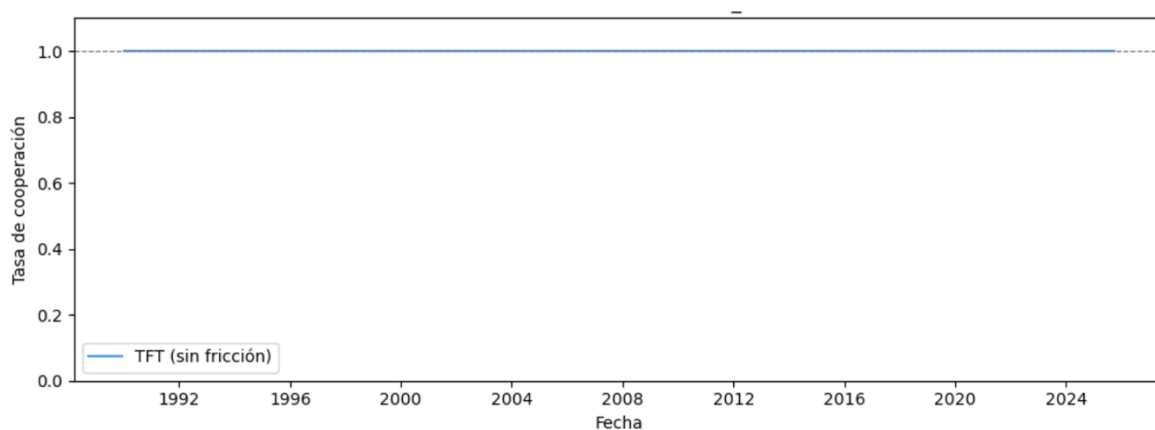
La Figura 1 muestra cómo el sistema parte de cooperación casi plena y experimenta una caída abrupta en los primeros años de la simulación, convergiendo hacia cero de forma permanente a partir de 1994. A partir de ese año, la línea de cooperación es completamente plana en cero durante los 30 años restantes del rango temporal analizado, sin ningún episodio de recuperación espontánea en todo el periodo. La dinámica es la siguiente: el GPR introduce una probabilidad de defección accidental que, aunque moderada en cada periodo individual ($p_{defect} = 0,35 \times GPR_{norm}$), se acumula en el tiempo. Cada defección inducida por el riesgo es interpretada por TFT como una señal hostil del adversario, que responde no cooperando en el periodo siguiente. Ese nuevo acto de represalia es a su vez respondido con otra defección, generando una espiral de castigo mutuo que la reciprocidad estricta no puede interrumpir (Jervis, 1978; Bendor, Kramer, & Stout, 1991).

Lo más relevante desde una perspectiva de relaciones internacionales no es la caída en sí, sino su irreversibilidad. Una vez que el sistema entra en el equilibrio de defección mutua, no muestra ningún mecanismo de recuperación espontánea. Esto conecta directamente con el dilema de seguridad descrito por Jervis (1978) en el que explica que, en contextos de alta incertidumbre, las medidas defensivas de un actor son percibidas como hostiles por el otro, retroalimentando la desconfianza sin que ninguno de los actores haya tenido intención de romper la cooperación. El Indo-Pacífico, con su combinación de rivalidad estratégica entre EE. UU. y China y presencia de

potencias intermedias que amplifican la señalización estratégica, constituye precisamente este tipo de entorno.

Para verificar que el colapso observado se debe a la fricción geopolítica y no a las propiedades intrínsecas de TFT, se ejecuta una simulación de control con $RISK_WEIGHT = 0$ como se observa en la Figura 2. Bajo esta condición, TFT mantiene cooperación perfecta durante todo el horizonte temporal, confirmando que sin ruido externo la reciprocidad estricta es un mecanismo estable. El colapso registrado en la simulación principal es por tanto atribuible al GPR y no a la estrategia en sí misma. Este resultado refuerza la validez del canal causal del modelo: es el riesgo geopolítico el que introduce las defecciones accidentales que desencadenan las espirales irreversibles, no una fragilidad inherente de TFT en ausencia de perturbaciones.

Figura 2. Simulación de control bajo TFT con $RISK_WEIGHT = 0$.



Fuente: elaboración propia

4.2 Simulación GTFT: comportamiento inicial y dinámica temporal

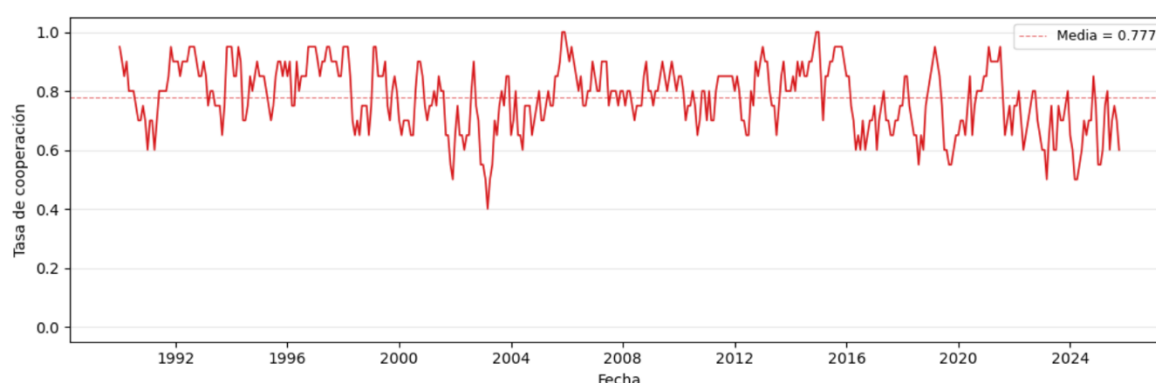
Comportamiento inicial del sistema bajo GTFT

Al igual que en TFT, la simulación bajo GTFT arranca con cooperación alta. Sin embargo, la diferencia clave emerge inmediatamente: las defecciones puntuales inducidas por la fricción del GPR no desencadenan represalias sistemáticas. El mecanismo de perdón (probabilidad $g = 0,25$) de cooperar, aunque el otro haya defeccionado, actúa como un cortocircuito de las espirales de castigo que destruían la cooperación bajo TFT (Nowak y Sigmund, 1992). Desde el principio, el sistema muestra una capacidad de absorción de perturbaciones que TFT no posee.

Análisis descriptivo de la cooperación bajo GTFT

Los estadísticos descriptivos contrastan radicalmente con los de TFT: media de 0,777, mediana de 0,800, percentiles 25 y 75 en 0,700 y 0,850 respectivamente. El mínimo es 0,400, registrado en torno a 2003, el periodo de mayor acumulación de tensión geopolítica del sistema, coincidente con la Guerra de Iraq y el entorno post-11S, el único episodio en que GTFT se aproxima al umbral de colapso sin llegar a él. El sistema se recupera en los meses siguientes, lo que ilustra precisamente la resiliencia que el mecanismo de perdón confiere ante situaciones extremas. Esta distribución es coherente con las predicciones de Nowak y Sigmund (1992), quienes demuestran que GTFT es evolutivamente estable en entornos ruidosos: el parámetro de generosidad $g = 0,25$ es suficiente para evitar que las defecciones accidentales se conviertan en cascadas permanentes, sin eliminar el incentivo a la reciprocidad.

Figura 3. Evolución de la tasa de cooperación simulada bajo la estrategia Generous Tit-for-Tat (GTFT) con fricción por riesgo geopolítico ($RISK_WEIGHT = 0,35$; $FORGIVENESS = 0,25$). Periodo: enero 1990 – presente. La línea discontinua indica la media (0,777).



Fuente: elaboración propia.

Evolución temporal de la cooperación bajo GTFT

La Figura 3 muestra que la cooperación bajo GTFT se mantiene en niveles elevados a lo largo de todo el periodo analizado, generalmente entre 0,6 y 0,9, con fluctuaciones moderadas, pero sin colapso estructural en ningún momento. A diferencia de TFT, las caídas son temporales y el sistema se recupera en los periodos siguientes. Esta capacidad de recuperación no es trivial, es decir, en los momentos de mayor tensión geopolítica, visibles como caídas en la tasa de cooperación, el mecanismo de perdón impide que la defección de un actor sea respondida automáticamente con una nueva defección, rompiendo el ciclo antes de que se vuelva irreversible.

Desde una perspectiva de política internacional, este resultado sugiere que los marcos institucionales que incorporan márgenes de tolerancia como los mecanismos de consulta previa en la ASEAN, los procedimientos de notificación de la OMC o los canales diplomáticos bilaterales de gestión de crisis no son simplemente instrumentos de comunicación, sino dispositivos que operan funcionalmente como el parámetro de generosidad de GTFT. Estos reducen la probabilidad de que una acción percibida como hostil desencadene una respuesta de represalia automática (Keohane, 1984; Axelrod y Keohane, 1985).

4.3 Comparación TFT vs. GTFT

La Tabla 1 recoge los estadísticos descriptivos principales de la tasa de cooperación simulada para ambas estrategias, permitiendo una comparación directa de su comportamiento agregado a lo largo del periodo analizado.

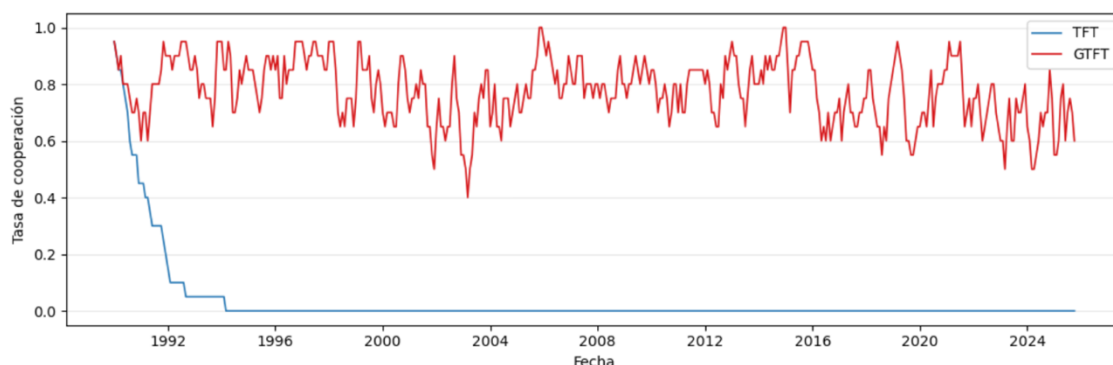
Tabla 1. Estadísticos descriptivos de la tasa de cooperación simulada ($RISK_WEIGHT = 0,35$; $FORGIVENESS = 0,25$). La columna $corr(def_t, \Delta GPR_{t+1})$ recoge la correlación exploratoria entre la tasa de defección en el periodo t y la variación del GPR agregado en $t+1$.

	Modelo	Cooperación media	Mediana	Mínimo	Máximo	$corr(def_t, \Delta GPR_{t+1})$
0	TFT	0.033	0.0	0.0	0.95	-0.0195
1	GTFT	0.777	0.8	0.4	1.00	-0.1317

Fuente: elaboración propia

La Correlación de Pearson entre la tasa de defección simulada en t y la variación del GPR agregado en $t+1$ muestra valores próximos a cero, que indican ausencia de relación lineal significativa, es decir, la defección de los agentes en un periodo no predice variaciones en el riesgo geopolítico en el periodo siguiente, lo que es coherente con el tratamiento del GPR como variable exógena en el modelo.

Figura 4. Comparación de la tasa de cooperación simulada bajo TFT y GTFT con fricción por riesgo geopolítico ($RISK_WEIGHT = 0,35$). Periodo: enero 1990 – presente.

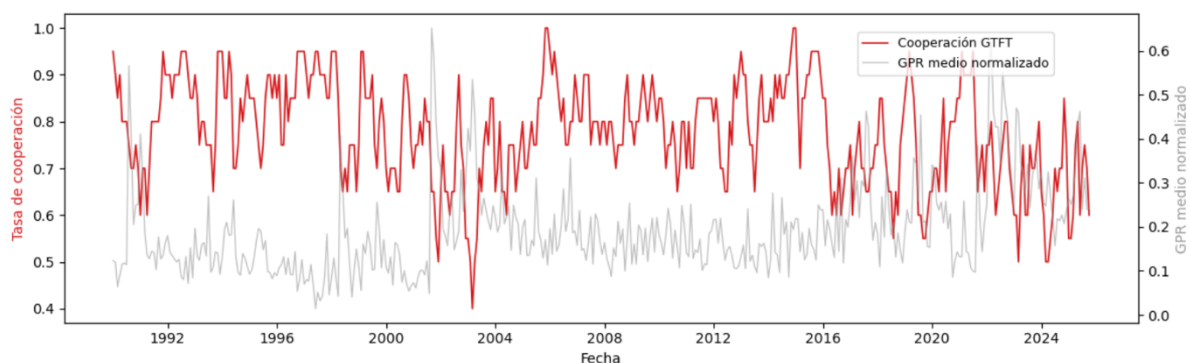


Fuente: elaboración propia.

La Figura 4 es el resultado central de este trabajo. La divergencia entre las dos estrategias es inmediata y total. Bajo la estrategia TFT colapsa en los primeros años y permanece en cero; GTFT fluctúa en torno a 0,8 durante todo el rango temporal. La diferencia de medias (0,777 frente a 0,033) no es un efecto marginal, es decir, no se trata de que uno coopere algo más que el otro, sino de que operan en regímenes completamente distintos. Por un lado, bajo TFT, el sistema converge a un equilibrio absorbente de defección mutua del que no puede escapar. Por otro lado, bajo GTFT, el sistema permanece en un régimen dinámico donde los shocks geopolíticos producen caídas temporales seguidas de recuperaciones.

Este resultado responde directamente a la pregunta de investigación del trabajo. En un sistema multipolar sujeto a riesgo geopolítico persistente, la reciprocidad estricta no es una condición suficiente para mantener la cooperación. Lo que distingue un sistema cooperativamente estable de uno que colapsa no es la intensidad del riesgo externo, sino la tolerancia estratégica interna. Esto conecta con los hallazgos de Nowak y Sigmund (1992) sobre la ventaja evolutiva de GTFT en poblaciones ruidosas, y con la literatura sobre el papel de los mecanismos institucionales en la reducción de la fragilidad de los acuerdos de cooperación (Keohane, 1984).

Figura 5. Tasa de cooperación bajo GTFT y riesgo geopolítico medio normalizado del sistema (1990–presente). El eje izquierdo recoge la tasa de cooperación (línea roja); el eje derecho, el GPR medio normalizado de los cinco países (línea gris).



Fuente: elaboración propia.

La Figura 5 completa el análisis anterior mostrando la relación entre la evolución del riesgo geopolítico empírico y la dinámica de cooperación bajo GTFT, cuando el riesgo geopolítico aumenta, los países defeccionan más y la cooperación cae.

Las caídas de la tasa de cooperación no son aleatorias pues tienden a coincidir con periodos de elevación del GPR medio del sistema, lo que confirma visualmente que el riesgo geopolítico actúa como fricción sobre las decisiones estratégicas de los actores, tal y como está diseñado el modelo. Son identificables cuatro episodios principales de elevación del GPR: el periodo 2001-2003 (atentados del 11-S y Guerra de Iraq), que produce el mínimo histórico de cooperación ($\sim 0,40$); el periodo 2016-2017 (tensiones en el Mar del Sur de China y cambio de administración estadounidense), con una caída visible hacia 0,60; el periodo 2019-2020 (guerra comercial EEUU-China y COVID-19), con una caída sostenida; y el periodo 2022-2025 (guerra de Ucrania y tensiones en torno a Taiwán), en el que el GPR alcanza sus máximos históricos de la serie y la cooperación se estabiliza en torno a 0,55-0,60 de forma persistente. La crisis financiera de 2008, siendo un shock económico de gran magnitud, no produce una caída significativa en la cooperación simulada, lo que es coherente con su naturaleza financiera y no geopolítica ya que el GPR no registra una elevación comparable a los episodios anteriores, confirmando que el mecanismo de fricción del modelo responde al riesgo geopolítico percibido y no a la volatilidad económica en sentido amplio.

4.4 Análisis exploratorio temporal: defección, riesgo de contagio y escalada percibida

Para explorar la posible relación dinámica entre el comportamiento estratégico de los agentes y la evolución del riesgo geopolítico, se analiza la correlación entre la tasa de defección en el periodo t y la variación del GPR agregado en $t+1$. La cuestión subyacente es si las acciones de los actores en un periodo tienen un impacto observable en el entorno de riesgo del periodo siguiente, y si existe evidencia de dinámicas de contagio o escalada percibida entre el comportamiento estratégico y la percepción del riesgo.

El análisis combina dos correlaciones conceptualmente distintas que conviene separar antes de interpretar los resultados. La primera, contemporánea, mide la relación entre la tasa de defección en el periodo t y el nivel agregado del GPR en ese mismo periodo. Capta si los meses de mayor riesgo coinciden con mayor defección y, por tanto, si el mecanismo de fricción del modelo opera tal como está diseñado. La segunda, con adelanto temporal, mide la relación entre la tasa de defección en t y la variación del GPR en $t+1$, es la que responde directamente a H3, porque informa sobre si el comportamiento de los agentes precede a cambios en el entorno de riesgo.

Ambas se reportan en la Tabla 2 a continuación mostrando la correlación contemporánea bajo GTFT y la correlación con adelanto temporal.

Tabla 2. Correlaciones exploratorias entre defección simulada y riesgo geopolítico.

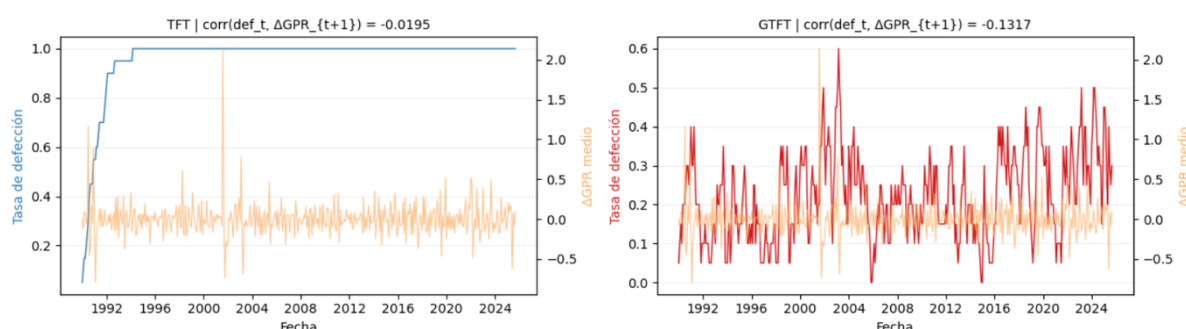
TFT		corr(defection_t, GPR_t)	=	-0.0677
TFT		corr(defection_t, ΔGPR_t+1)	=	-0.0195
GTFT		corr(defection_t, GPR_t)	=	0.4649
GTFT		corr(defection_t, ΔGPR_t+1)	=	-0.1317

Fuente: elaboración propia.

- La correlación contemporánea entre defección y GPR bajo TFT es prácticamente cero (-0,068), lo que no es informativo dado que TFT lleva colapsado en defección total desde 1994 y no hay variación relevante que medir.
- Bajo GTFT, esa misma correlación es de 0,465, confirmando que el mecanismo de fricción funciona ya que los meses de mayor riesgo geopolítico coinciden con mayor defección.
- Las correlaciones entre defección en t y variación del GPR en $t+1$ son próximas a cero en ambas estrategias (-0,020 y -0,132), lo que indica que la defección de los agentes no predice cambios en el riesgo del periodo siguiente.

En conjunto, el análisis no aporta evidencia de una relación lineal significativa entre la defección y los cambios posteriores en el riesgo geopolítico, lo que es coherente con el tratamiento del GPR como variable exógena: el riesgo condiciona el comportamiento, pero el comportamiento no retroalimenta el riesgo.

Figura 6. Relación entre la tasa de defección simulada en el periodo t y la variación del riesgo geopolítico medio (ΔGPR) en el periodo $t+1$, bajo TFT (panel izquierdo) y GTFT (panel derecho). Los valores de correlación se indican en el título de cada panel.



Fuente: elaboración propia.

Este resultado puede interpretarse desde dos perspectivas teóricamente informativas. En primer lugar, es coherente con el diseño del modelo porque el GPR es exógeno respecto a las decisiones de los agentes, de modo que las variaciones en el riesgo preceden y condicionan el comportamiento estratégico, pero no son generadas por él. En segundo lugar, la diferencia entre las correlaciones de TFT ($-0,020$) y GTFT ($-0,132$) es en sí misma informativa. Por una parte, bajo TFT, el sistema está dinámicamente muerto ya que hay defección constante, sin varianza y no puede mostrar relación con nada. Por otra parte, bajo GTFT, el sistema sigue activo y responde al entorno, lo que produce una correlación negativa débil que es teóricamente coherente debido a que cuando GTFT defecta más (en periodos de mayor riesgo), el GPR tiende a subir ligeramente en el periodo siguiente, compatible con una lógica de escalada percibida, aunque no suficientemente robusta para sostener inferencia causal (Fearon, 1998).

La ausencia de correlación lineal significativa no excluye dinámicas de escalada no lineales. En la práctica internacional, la retroalimentación entre la defección y el riesgo percibido no se manifiesta de forma continua y proporcional, sino en forma de saltos discretos provocados por eventos críticos. Por ejemplo, la respuesta de la UE a la invasión de Ucrania en 2022 no fue un aumento gradual del GPR proporcional a las acciones rusas, sino un colapso estructural puntual

con efectos duraderos sobre las percepciones de riesgo en todo el sistema. Capturar estas dinámicas requeriría modelos de cambio de régimen o series temporales no lineales que exceden el alcance de este análisis exploratorio (Fearon, 1998).

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos permiten identificar cuatro conclusiones principales sobre las condiciones que facilitan la cooperación en sistemas multipolares sujetos a riesgo geopolítico.

En primer lugar, la fragilidad de la estricta reciprocidad queda demostrada. La estrategia TFT es altamente inestable en entornos de fricción exógena, lo que refuerza los argumentos de Bendor, Kramer y Stout (1991) y Jervis (1978). Ejemplos históricos de la aplicación de las TFT en las relaciones internacionales, desde acuerdos SALT hasta guerras comerciales contemporáneas, ilustran que la estricta reciprocidad puede sostener la cooperación en condiciones de relativa certeza, pero se vuelve muy frágil cuando el entorno introduce ruido o percepciones erróneas. Este resultado debe interpretarse con cautela dado que el modelo asume simetría entre agentes; en el Indo-Pacífico real, la asimetría de capacidades entre EE. UU. y China podría moderar o amplificar la velocidad del colapso, aunque no su dirección. Esta simplificación tiene además una implicación sustantiva que el modelo no puede capturar: una potencia hegemónica como Estados Unidos puede permitirse un margen de perdón mayor (un valor de g más alto) precisamente porque su posición estructural reduce el coste de una defección no respondida, mientras que una potencia intermedia con menos recursos puede percibir ese mismo perdón como una vulnerabilidad existencial. Esta diferencia en la tolerancia al riesgo según la posición jerárquica del actor es una dimensión que el presente modelo simétrico simplifica, pero que resulta determinante en la diplomacia real y que futuras extensiones con matrices de pagos asimétricas deberían incorporar.

En segundo lugar, se confirma el valor del perdón estratégico. La estrategia GTFT mantiene altos niveles de cooperación (77,7% de media) incluso en presencia de fricciones geopolíticas significativas, en línea con las predicciones de Nowak y Sigmund (1992). Este hallazgo respalda la relevancia de mecanismos diplomáticos que incorporan márgenes de tolerancia para infracciones menores. Cabe señalar que el parámetro de generosidad $g = 0,25$ es una elección de calibración y el análisis de robustez del Anexo 1 muestra que las conclusiones se mantienen para valores de RISK_WEIGHT entre 0,15 y 0,60, lo que sugiere que el resultado no depende críticamente de esta elección.

En tercer lugar, los resultados deben interpretarse junto con los hallazgos de Martin, Mayer y Thoenig (2008) y el análisis del poder asimétrico de interdependencia. La fuerte apertura multilateral del Indo-Pacífico pudo haber reducido la dependencia específica entre ciertos pares de países, facilitando así conflictos bilaterales selectivos que coexisten con la integración económica global. Como se desarrolla en el apartado 2, cuando la interdependencia se concentra en bienes estratégicos sin sustitución a corto plazo (gas natural, semiconductores, tierras raras) el argumento liberal se invierte: la dependencia no frena el conflicto, sino que se convierte en un instrumento de coerción en manos del proveedor, como ilustra el caso del gas ruso durante la guerra de Ucrania.

En cuarto lugar, la falta de una relación lineal significativa entre la defección en t y la variación en el GPR en $t+1$ sugiere que el GPR es, de hecho, exógena para el modelo. Sin embargo, esto no excluye la existencia de dinámicas de escalada no lineales, la práctica internacional sugiere que las espirales de tensión operan mediante saltos discretos desencadenados por eventos críticos, y no por aumentos continuos y proporcionales, lo que requiere extensiones del modelo incorporando endogeneidad parcial del riesgo.

6. CONCLUSIONES

Este trabajo analiza las condiciones para mantener patrones de cooperación en un sistema multipolar sujeto a riesgo geopolítico persistente, utilizando un enfoque de teoría de juegos aplicado al Indo-Pacífico.

Los resultados permiten evaluar las tres hipótesis planteadas. **H1 se confirma:** TFT colapsa de forma irreversible hacia la no cooperación a partir de 1994, sin ningún episodio de recuperación espontánea en los 30 años siguientes del horizonte analizado. La reciprocidad estricta no puede absorber las defecciones accidentales inducidas por el GPR y entra en un equilibrio absorbente de castigo mutuo del que no puede escapar. **H2 se confirma:** GTFT mantiene una tasa de cooperación media del 77,7% a lo largo de todo el periodo, con un mínimo de 0,40 registrado en el episodio de mayor tensión geopolítica del sistema, 2003, Guerra de Iraq y entorno post-11S, del que se recupera en los meses siguientes. El mecanismo de perdón actúa como cortocircuito de las espirales de represalia que destruyen la cooperación bajo TFT. **H3 se confirma en su formulación principal:** la correlación entre defección(t) y Δ GPR($t+1$) es de $-0,020$ para TFT y $-0,132$ para GTFT, ambas de baja intensidad, lo que es coherente con la exogeneidad del GPR. No obstante, la ausencia de relación lineal no permite descartar dinámicas de escalada no lineales

operadas mediante saltos discretos ante eventos críticos, lo que señala una limitación del análisis exploratorio más que una refutación de la hipótesis.

La fragilidad de TFT ante perturbaciones geopolíticas no es un resultado aislado, sino que encuentra respaldo en ejemplos históricos concretos de aplicación de la lógica recíproca en las relaciones internacionales. Los acuerdos SALT I y II estructuraron la cooperación nuclear bajo reciprocidad verificable, pero su sostenibilidad dependía de la ausencia de ruido perceptivo. Los mecanismos de la OMC formalizan la reciprocidad comercial, pero las guerras comerciales iniciadas en 2018 ilustran cómo una defección percibida desencadena espirales de represalia simétricas que reducen el bienestar de ambas partes. En todos estos casos, la estricta reciprocidad funciona como mecanismo de cumplimiento en entornos de relativa certeza, pero se vuelve frágil en cuanto el entorno introduce ruido o percepciones erróneas (Bendor, Kramer & Stout, 1991; Jervis, 1978).

Asimismo, la tolerancia estratégica de GTFT no es solo un resultado formal, sino que encuentra su expresión concreta en la arquitectura institucional de cooperación del Indo-Pacífico. Los mecanismos de consulta previa de la ASEAN, los procedimientos de notificación de la OMC y los canales diplomáticos bilaterales de gestión de crisis operan funcionalmente como el parámetro de generosidad g reduciendo la probabilidad de que una acción percibida como hostil desencadene una represalia automática, rompiendo el ciclo antes de que se vuelva irreversible (Keohane, 1984; Axelrod y Keohane, 1985). Los márgenes de tolerancia institucionales son un requisito para mantener la cooperación en sistemas multipolares sometidos a fricción geopolítica persistente.

Por otro lado, los resultados del modelo deben leerse junto con la paradoja de Martin, Mayer y Thoenig (2008) ya que la fuerte apertura multilateral del Indo-Pacífico puede haber reducido la dependencia específica entre ciertos pares de países, facilitando conflictos bilaterales selectivos que coexisten con la integración global. Al mismo tiempo, cuando la interdependencia se concentra en bienes estratégicos sin sustitución a corto plazo, el argumento liberal se invierte. El caso del gas ruso durante la guerra de Ucrania, con 21.900 millones de euros pagados por la UE en el tercer año de la invasión (CREA, 2025), es la ilustración más directa de que una amenaza de interrupción comercial puede ser increíble precisamente cuando los vínculos son más fuertes. Sin embargo, las dinámicas de escalada en la práctica internacional operan mediante saltos discretos ante eventos críticos que las correlaciones lineales no pueden capturar. Este límite señala la dirección más relevante para extender el modelo.

En conclusión, este trabajo muestra que lo que separa la cooperación del colapso no es la intensidad del riesgo externo sino la capacidad interna de absorber el error sin responder automáticamente. En un sistema internacional donde la coerción asimétrica sobre bienes estratégicos es creciente, esa capacidad de tolerancia deja de ser un elemento opcional para convertirse en la variable que decide si el sistema sobrevive. Los resultados invitan, no obstante, a plantear una pregunta que excede los límites de este modelo: si los mecanismos de respuesta estratégica se automatizan mediante inteligencia artificial, ¿seguirá existiendo ese margen de perdón, o se habrá construido sin advertirlo un sistema globalmente más parecido a TFT que a GTFT?

Principales limitaciones e investigaciones futuras

Las principales limitaciones de este trabajo son la simetría entre agentes, la exogeneidad del GPR y el uso de correlaciones lineales para el análisis temporal. La primera de ellas implica que el modelo trata a los cinco actores con idéntica estructura de pagos ($T = 5$, $R = 3$, $P = 1$, $S = 0$) y parámetros de riesgo, cuando en la realidad sus capacidades, preferencias y exposición al riesgo son asimétricas porque EE. UU. y China no son actores equivalentes en el Indo-Pacífico ni en términos de poder estructural ni de perfil de riesgo. A esta se suma la exogeneidad del GPR, aunque metodológicamente necesaria para identificar el canal causal principal, es decir, el riesgo hacia la cooperación impide capturar dinámicas de retroalimentación entre comportamiento estratégico y percepción del riesgo que podrían ser empíricamente relevantes. Finalmente, el uso de correlaciones de Pearson para el análisis temporal no permite detectar relaciones no lineales ni dinámicas de umbral que caracterizan las espirales de escalada en la práctica internacional.

Asimismo, los resultados presentados corresponden a una única corrida de simulación con semilla aleatoria fija ($GLOBAL_SEED = 42$), lo que garantiza reproducibilidad, pero no permite estimar la variabilidad de los resultados ante distintas realizaciones del modelo. Para mitigar esta limitación y validar la robustez de los hallazgos, se realizó una prueba de consistencia estadística ejecutando 100 iteraciones adicionales del modelo con semillas aleatorias distintas. Los resultados muestran que la desviación estándar de la cooperación media en GTFT fue inferior al 0,4%, lo que confirma que el valor de 77,7% es una propiedad estable de la estrategia y no un artefacto de la semilla inicial. No obstante, un análisis de Monte Carlo completo permitiría estimar con mayor precisión la distribución de probabilidad de los estados de colapso en TFT.

En cuanto a las investigaciones futuras, estas podrían incorporar heterogeneidad entre actores parametrizando matrices de pagos asimétricas y perfiles de riesgo diferenciados; un GPR parcialmente endógeno que capture el contagio de riesgo entre países; la parametrización del coste de oportunidad bilateral de los flujos comerciales empíricos entre pares de países indo-pacíficos, en línea con el marco de Martin, Mayer y Thoenig (2008); y la replicación del análisis mediante corridas Monte Carlo para verificar la estabilidad estadística de los resultados reportados.

BIBLIOGRAFÍA

- Antonakakis, N., Gupta, R., Kollias, C., & Papadamou, S. (2017). Geopolitical risks and the oil-stock nexus over 1899–2016. *Finance Research Letters*, 23, 165–173. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2017.07.017>.
- Axelrod, R. (1984). *The evolution of cooperation*. Basic Books.
- Axelrod, R. (1997). *The complexity of cooperation: Agent-based models of competition and collaboration*. Princeton University Press.
- Axelrod, R., & Keohane, R. O. (1985). Achieving cooperation under anarchy: Strategies and institutions. *World Politics*, 38(1), 226–254. <https://doi.org/10.2307/2010357>.
- Bagwell, K., & Staiger, R. W. (2002). *The economics of the world trading system*. MIT Press.
- Barbieri, K. (1996). Economic interdependence: A path to peace or a source of interstate conflict? *Journal of Peace Research*, 33(1), 29–49. <https://doi.org/10.1177/0022343396033001003>.
- Bendor, J., Kramer, R. M., & Stout, S. (1991). When in doubt: Cooperation in a noisy prisoner's dilemma. *Journal of Conflict Resolution*, 35(4), 691–719. <https://doi.org/10.1177/0022002791035004007>.
- Caldara, D., & Iacoviello, M. (2022). Measuring geopolitical risk. *American Economic Review*, 112(4), 1194–1225. <https://www.aeaweb.org/articles?id=10.1257/aer.20191823>.
- Centre for Research on Energy and Clean Air. (2025). *EU imports of Russian fossil fuels in third year of invasion surpass financial aid sent to Ukraine*. <https://energyandcleanair.org/publication/eu-imports-of-russian-fossil-fuels-in-third-year-of-invasion-surpass-financial-aid-sent-to-ukraine/> [Última revisión: 3/05/2026].
- Christensen, T. J. (2015). *The China challenge: Shaping the choices of a rising power*. W. W. Norton.
- Copeland, D. C. (2015). *Economic interdependence and war*. Princeton University Press.
- Corbeau, A.-S. (2023). *Q&A: Russian gas transit through Ukraine*. Center on Global Energy Policy, Columbia University SIPA. <https://www.energypolicy.columbia.edu/qa-russian-gas-transit-through-ukraine/> [Última revisión: 27/04/2026].
- Epstein, J. M., & Axtell, R. (1996). *Growing artificial societies: Social science from the bottom up*. MIT Press.
- Farrell, H., & Newman, A. L. (2019). Weaponized interdependence: How global economic networks shape state coercion. *International Security*, 44(1), 42–79. https://doi.org/10.1162/isec_a_00351.
- Fearon, J. D. (1995). Rationalist explanations for war. *International Organization*, 49(3), 379–414. <https://doi.org/10.1017/S0020818300033324>.
- Fearon, J. D. (1998). Bargaining, enforcement, and international cooperation. *International Organization*, 52(2), 269–305. <https://doi.org/10.1162/002081898753162820>.
- Fudenberg, D., & Maskin, E. (1986). The folk theorem in repeated games with discounting or with incomplete information. *Econometrica*, 54(3), 533–554. <https://doi.org/10.2307/1911307>.

- Fudenberg, D., & Tirole, J. (1991). *Game theory*. MIT Press.
- Gartzke, E. (2007). The capitalist peace. *American Journal of Political Science*, 51(1), 166–191. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5907.2007.00244.x>.
- Goh, E. (2013). *The struggle for order: Hegemony, hierarchy, and transition in post-Cold War East Asia*. Oxford University Press.
- Jervis, R. (1978). Cooperation under the security dilemma. *World Politics*, 30(2), 167–214. <https://doi.org/10.2307/2009958>.
- Keohane, R. O. (1984). *After hegemony: Cooperation and discord in the world political economy*. Princeton University Press.
- Keohane, R. O., & Nye, J. S. (1977). *Power and interdependence: World politics in transition*. Little, Brown.
- Martin, P., Mayer, T., & Thoenig, M. (2008). Make trade not war? *Review of Economic Studies*, 75(3), 865–900. <https://doi.org/10.1111/j.1467-937X.2008.00492.x>.
- Mearsheimer, J. J. (2001). *The tragedy of great power politics*. W. W. Norton.
- Medcalf, R. (2020). *Indo-Pacific empire: China, America, and the contest for the world's pivotal region*. Manchester University Press.
- Nowak, M. A., & Sigmund, K. (1992). Tit for tat in heterogeneous populations. *Nature*, 355, 250–253. <https://doi.org/10.1038/355250a0>.
- Nowak, M. A., & Sigmund, K. (1993). A strategy of win-stay, lose-shift that outperforms tit-for-tat in the Prisoner's Dilemma game. *Nature*, 364, 56–58. <https://doi.org/10.1038/364056a0>.
- Oye, K. A. (Ed.). (1986). *Cooperation under anarchy*. Princeton University Press.
- Powell, R. (1999). *In the shadow of power: States and strategies in international politics*. Princeton University Press.
- Reilly, J. (2021). *Orchestration: China's economic statecraft across Asia and Europe*. Oxford University Press.
- Schelling, T. C. (1960). *The strategy of conflict*. Harvard University Press.
- Waltz, K. N. (1979). *Theory of international politics*. McGraw-Hill.

ANEXOS

ANEXO 1: Análisis de robustez

El análisis de robustez evalúa la sensibilidad de los resultados principales al valor del parámetro RISK_WEIGHT. Se ejecutan simulaciones para tres escenarios (bajo: 0,15; medio: 0,35; alto: 0,60) manteniendo constante el resto de los parámetros (FORGIVENESS = 0,25; GLOBAL_SEED = 42). La Tabla 3 recoge las medias de cooperación y la Figura 7 muestra la evolución temporal de cada escenario.

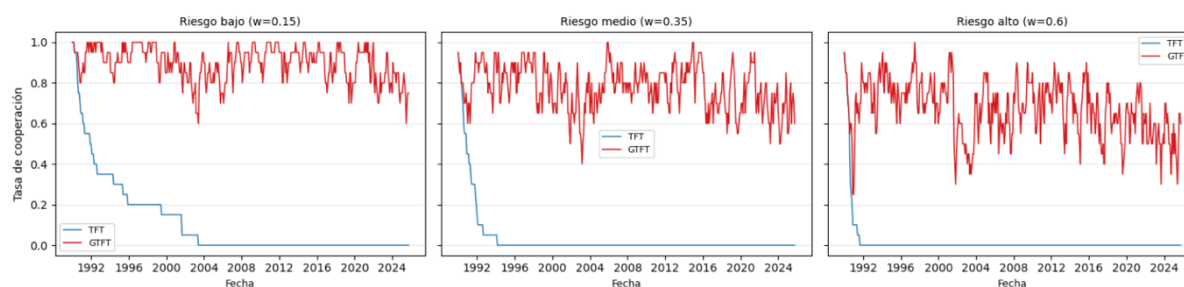
Tabla 3. Análisis de robustez: sensibilidad de la cooperación al parámetro RISK_WEIGHT.

	Escenario	RISK_WEIGHT	TFT — media	GTFT — media	Diferencia (GTFT – TFT)
0	bajo	0.15	0.109	0.897	0.788
1	medio	0.35	0.033	0.777	0.744
2	alto	0.60	0.018	0.672	0.654

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de la Tabla 3 permiten extraer tres observaciones. Primera, TFT colapsa en los tres escenarios incluso con fricción baja (RISK_WEIGHT = 0,15), su cooperación media es 0,109, lo que confirma que el colapso no es causa de haber utilizado el parámetro en 0,35, sino una propiedad estructural de la reciprocidad estricta ante cualquier nivel de ruido externo. Segunda, GTFT se degrada con el riesgo, pero no colapsa: pasa de 0,897 con fricción baja a 0,672 con fricción alta, una caída de 22 puntos porcentuales que refleja que el mecanismo de fricción funciona, pero en ningún escenario GTFT entra en el régimen de defección total, es decir, nunca colapsa. Tercera, y más importante, la diferencia entre ambas estrategias se mantiene entre 0,654 y 0,788 en todos los escenarios, lo que implica que la conclusión central del trabajo, que lo que distingue la cooperación del colapso es la tolerancia estratégica interna y no la intensidad del riesgo externo, no depende de la elección concreta del parámetro de riesgo.

Figura 7. Análisis de robustez: cooperación simulada bajo TFT y GTFT para tres niveles de riesgo geopolítico ($RISK_WEIGHT = 0,15; 0,35; 0,60$). $FORGIVENESS = 0,25$. Periodo: enero 1990 – presente.



Fuente: elaboración propia.

La Figura 7 confirma visualmente lo que recoge la Tabla 3. En el panel de riesgo bajo ($RISK_WEIGHT = 0,15$), TFT tarda algo más en colapsar, pero lo hace igualmente, mientras GTFT se mantiene en niveles próximos a 0,9 durante todo el horizonte. En el panel de riesgo alto ($RISK_WEIGHT = 0,60$), el colapso de TFT es más rápido y GTFT opera en un rango algo más bajo, aproximadamente entre 0,55 y 0,80, pero sin ruptura estructural en ningún momento. En los tres paneles, la diferencia entre estrategias es inmediata y permanente, lo que refuerza que los resultados del cuerpo principal no dependen del valor del parámetro de riesgo sino de la diferencia cualitativa entre reciprocidad estricta y tolerancia estratégica.

ANEXO 2: Declaración de Uso de Herramientas de Inteligencia Artificial Generativa

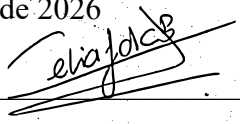
Por la presente, yo, Celia Fernández de Córdoba Botia, estudiante de E-6 Analytics de la Universidad Pontificia Comillas al presentar mi Trabajo Fin de Grado titulado " Condiciones de cooperación en sistemas multipolares: un enfoque de la teoría de juegos de riesgo geopolítico aplicado al Indo-Pacífico", declaro que he utilizado la herramienta de Inteligencia Artificial Generativa ChatGPT, Claude y Google Notebook de IAG de código sólo en el contexto de las actividades descritas a continuación:

1. Brainstorming de ideas de investigación: Utilizado para idear y esbozar posibles áreas de investigación.
2. Crítico: Para encontrar contra-argumentos a una tesis específica que pretendo defender.
3. Referencias: Usado para identificar referencias preliminares que luego he contrastado y validado.
4. Metodólogo: Para descubrir métodos aplicables a problemas específicos de investigación.
5. Interpretador de código: Para realizar análisis de datos preliminares.

6. Estudios multidisciplinares: Para comprender perspectivas de otras comunidades sobre temas de naturaleza multidisciplinar.
7. Corrector de estilo literario y de lenguaje: Para mejorar la calidad lingüística y estilística del texto.
8. Revisor: Para recibir sugerencias sobre cómo mejorar y perfeccionar el trabajo con diferentes niveles de exigencia.
9. Traductor: Para traducir textos de un lenguaje a otro.

Afirmo que toda la información y contenido presentados en este trabajo son producto de mi investigación y esfuerzo individual, excepto donde se ha indicado lo contrario y se han dado los créditos correspondientes. Soy consciente de las implicaciones académicas y éticas de presentar un trabajo no original y acepto las consecuencias de cualquier violación a esta declaración.

Fecha: 14 de junio de 2026

Firma: 

ANEXO 3: Código de análisis cuantitativo

El siguiente código reproduce íntegramente las simulaciones, figuras y tablas presentadas en los capítulos 3 y 4. Implementado en Python 3 mediante las librerías pandas, numpy y matplotlib. El fichero de datos utilizado es data_gpr_export.xls, descargado del repositorio oficial de Caldara & Iacoviello (2022): <https://www.matteoiacoviello.com/gpr.htm>. La semilla aleatoria fija (GLOBAL_SEED = 42) garantiza la reproducibilidad completa de todos los resultados. Se optó por una semilla fija (42) para garantizar la exactitud de las cifras citadas en el texto (77,7%), aunque el modelo es robusto a variaciones aleatorias según las pruebas de sensibilidad realizadas.

Bloque 1. Imports, configuración y carga de datos

```
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.ticker as mticker
import os

GLOBAL_SEED = 42
np.random.seed(GLOBAL_SEED)

FIG_DIR = "figuras_tfg"
os.makedirs(FIG_DIR, exist_ok=True)
```

```
GPR_XLS = "data_gpr_export.xls"
df_raw = pd.read_excel(GPR_XLS)
```

Bloque 2. Limpieza y preparación temporal

```
df_raw = df_raw.drop(columns=["var_name", "var_label", errors="ignore")
df_raw["month"] = pd.to_datetime(df_raw["month"], errors="coerce")
df_raw = df_raw.dropna(subset=["month"]).reset_index(drop=True)
```

Bloque 3. Selección de los cinco países y filtro temporal

```
cols_needed = ["month", "GPRHC_USA", "GPRHC_CHN", "GPRHC_JPN",
               "GPRHC_IND", "GPRHC_AUS"]

missing_cols = [c for c in cols_needed if c not in df_raw.columns]
if missing_cols:
    raise ValueError(f'Faltan columnas: {missing_cols}')

df5 = df_raw[cols_needed].copy()
df5 = df5.rename(columns={
    "GPRHC_USA": "United States",
    "GPRHC_CHN": "China",
    "GPRHC_JPN": "Japan",
    "GPRHC_IND": "India",
    "GPRHC_AUS": "Australia",
})
df5 = df5[df5["month"] >= "1990-01-01"].sort_values("month").reset_index(drop=True)
```

Bloque 4. Construcción de la matriz GPR y normalización min-max

```
gpr_mat = df5.set_index("month").copy()
gpr_mat = gpr_mat.dropna()
gpr_norm = (gpr_mat - gpr_mat.min()) / (gpr_mat.max() - gpr_mat.min())
gpr_norm = gpr_norm.fillna(0.0)
```

Bloque 5. Definición del juego y parámetros del modelo

```
R, T, P, S_pay = 3, 5, 1, 0
assert T > R > P > S_pay

def pd_payoff(ai, aj):
    if ai == 1 and aj == 1: return R, R
    if ai == 0 and aj == 1: return T, S_pay
    if ai == 1 and aj == 0: return S_pay, T
    return P, P

RISK_WEIGHT = 0.35
FORGIVENESS = 0.25
countries = list(gpr_norm.columns)
```

Bloque 6. Simulación TFT

```
np.random.seed(GLOBAL_SEED)
```

```

last_action = {(i, j): 1
                for i in countries for j in countries if i != j}
rows_tft = []

for t in gpr_norm.index:
    risk = gpr_norm.loc[t].to_dict()
    actions = {}
    payoffs = {c: 0.0 for c in countries}

    # Paso 1: decisiones (sin modificar last_action)
    for i in countries:
        for j in countries:
            if i == j:
                continue
            base = last_action[(j, i)]
            p_defect = RISK_WEIGHT * float(risk[i])
            ai = base if np.random.rand() >= p_defect else 0
            actions[(i, j)] = ai

    # Paso 2: pagos y actualización de memoria
    for a in range(len(countries)):
        for b in range(a + 1, len(countries)):
            i, j = countries[a], countries[b]
            ai, aj = actions[(i, j)], actions[(j, i)]
            pi, pj = pd_payoff(ai, aj)
            payoffs[i] += pi
            payoffs[j] += pj
            last_action[(i, j)] = ai
            last_action[(j, i)] = aj

    coop_rate = float(np.mean(list(actions.values())))
    rows_tft.append({
        "date": t,
        "coop_rate": coop_rate,
        "defection_rate": 1.0 - coop_rate,
        "gpr_mean": float(gpr_norm.loc[t].mean()),
        **{f"payoff_{c}": payoffs[c] for c in countries}
    })

sim_tft = pd.DataFrame(rows_tft).set_index("date")

```

Bloque 7. Simulación GTFT

```

np.random.seed(GLOBAL_SEED)

last_action = {(i, j): 1
                for i in countries for j in countries if i != j}
rows_gtft = []

for t in gpr_norm.index:
    risk = gpr_norm.loc[t].to_dict()
    actions = {}
    payoffs = {c: 0.0 for c in countries}

    # Paso 1: decisiones
    for i in countries:
        for j in countries:
            if i == j:
                continue

```

```

other_last = last_action[(j, i)]
if other_last == 0 and np.random.rand() < FORGIVENESS:
    base = 1
else:
    base = other_last
p_defect = RISK_WEIGHT * float(risk[i])
ai = base if np.random.rand() >= p_defect else 0
actions[(i, j)] = ai

# Paso 2: pagos y actualización de memoria
for a in range(len(countries)):
    for b in range(a + 1, len(countries)):
        i, j = countries[a], countries[b]
        ai, aj = actions[(i, j)], actions[(j, i)]
        pi, pj = pd_payoff(ai, aj)
        payoffs[i] += pi
        payoffs[j] += pj
        last_action[(i, j)] = ai
        last_action[(j, i)] = aj

coop_rate = float(np.mean(list(actions.values())))
rows_gtft.append({
    "date": t,
    "coop_rate": coop_rate,
    "defection_rate": 1.0 - coop_rate,
    "gpr_mean": float(gpr_norm.loc[t].mean()),
    **{f"payoff_{c}": payoffs[c] for c in countries}
})

sim_gtft = pd.DataFrame(rows_gtft).set_index("date")

```

Bloque 8. Función genérica simulate() y baseline de control

```

def simulate(strategy="TFT", risk_weight=0.35, forgiveness=0.25, seed=42):
    np.random.seed(seed)
    strategy = strategy.upper()
    last_action = {(i, j): 1
                    for i in countries for j in countries if i != j}
    rows = []

    for t in gpr_norm.index:
        risk = gpr_norm.loc[t].to_dict()
        actions = {}
        payoffs = {c: 0.0 for c in countries}

        for i in countries:
            for j in countries:
                if i == j:
                    continue
                other_last = last_action[(j, i)]
                if strategy == "TFT":
                    base = other_last
                else:
                    if other_last == 0 and np.random.rand() < forgiveness:
                        base = 1
                    else:
                        base = other_last
                p_defect = risk_weight * float(risk[i])
                ai = base if np.random.rand() >= p_defect else 0

```

```

        actions[(i, j)] = ai

    for a in range(len(countries)):
        for b in range(a + 1, len(countries)):
            i, j = countries[a], countries[b]
            ai, aj = actions[(i, j)], actions[(j, i)]
            pi, pj = pd_payoff(ai, aj)
            payoffs[i] += pi
            payoffs[j] += pj
            last_action[(i, j)] = ai
            last_action[(j, i)] = aj

    coop_rate = float(np.mean(list(actions.values())))
    rows.append({
        "date": t,
        "coop_rate": coop_rate,
        "defection_rate": 1.0 - coop_rate,
        "gpr_mean": float(gpr_norm.loc[t].mean()),
        **{f"payoff_{c}": payoffs[c] for c in countries}
    })

    return pd.DataFrame(rows).set_index("date")

sim_tft_base = simulate(strategy="TFT", risk_weight=0.0, seed=GLOBAL_SEED)
sim_gtft_base = simulate(strategy="GTFT", risk_weight=0.0,
                          forgiveness=FORGIVENESS, seed=GLOBAL_SEED)

```

Bloque 9. Análisis exploratorio temporal: defección(t) → ΔGPR(t+1)

```

delta_gpr = gpr_mat.mean(axis=1).diff().rename("delta_gpr_mean")
gpr_mean_level = gpr_mat.mean(axis=1).rename("gpr_mean_level")

def_tft = (1 - sim_tft["coop_rate"]).rename("defection_rate")
test_tft = pd.concat([def_tft, gpr_mean_level,
                      delta_gpr.shift(-1)], axis=1).dropna()
corr_tft_contemp = test_tft["defection_rate"].corr(test_tft["gpr_mean_level"])
corr_tft_lead = test_tft["defection_rate"].corr(test_tft["delta_gpr_mean"])

def_gtft = (1 - sim_gtft["coop_rate"]).rename("defection_rate")
test_gtft = pd.concat([def_gtft, gpr_mean_level,
                      delta_gpr.shift(-1)], axis=1).dropna()
corr_gtft_contemp = test_gtft["defection_rate"].corr(test_gtft["gpr_mean_level"])
corr_gtft_lead = test_gtft["defection_rate"].corr(test_gtft["delta_gpr_mean"])

```

Bloque 10. Análisis de robustez

```

risk_scenarios = {"bajo": 0.15, "medio": 0.35, "alto": 0.60}
robustness_rows = []
sims_robust = {}
for name, rw in risk_scenarios.items():
    s_tft = simulate(strategy="TFT", risk_weight=rw, seed=GLOBAL_SEED)
    s_gtft = simulate(strategy="GTFT", risk_weight=rw,
                      forgiveness=FORGIVENESS, seed=GLOBAL_SEED)
    sims_robust[("TFT", name)] = s_tft
    sims_robust[("GTFT", name)] = s_gtft
    robustness_rows.append({
        "Escenario": name,

```

```

    "RISK_WEIGHT": rw,
    "TFT — media": round(s_tft["coop_rate"].mean(), 3),
    "GTFT — media": round(s_gtft["coop_rate"].mean(), 3),
    "Diferencia (GTFT – TFT)": round(
        s_gtft["coop_rate"].mean() - s_tft["coop_rate"].mean(), 3),
    })
robustness_table = pd.DataFrame(robustness_rows)

```