



**EL DILEMA DE LA INACCIÓN: RIESGOS ECONÓMICOS Y ESTRATEGIA EN EL
CAMBIO CLIMÁTICO**

THE INACTION DILEMMA: ECONOMIC RISKS AND STRATEGY IN CLIMATE
CHANGE

MARÍA JOSÉ RIOS CARMONA

TRABAJO DE GRADO

ASESOR

JUAN CAMILO CHAPARRO

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE FINANZAS, ECONOMÍA Y GOBIERNO
ECONOMÍA
MEDELLÍN
2025

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	5
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	6
3. JUSTIFICACIÓN	7
4. OBJETIVOS	7
4.1 GENERAL	7
4.2 ESPECÍFICOS	7
5. MARCO TEÓRICO	8
5.1 CAMBIO CLIMÁTICO Y EFECTOS ECONÓMICOS	8
5.2 NEGOCIACIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO	9
5.3 TEORÍA DE JUEGOS EN NEGOCIACIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO	10
6. DISEÑO METODOLÓGICO	12
7. DESARROLLO DEL JUEGO	12
7.1 JUGADORES	13
7.2 ACCIONES	14
7.3 FUNCIÓN DE PAGOS	15
7.4 RONDAS Y SUPUESTOS	18
8. RESULTADOS	22
9. DISCUSIÓN	25
10. CONCLUSIONES	26
11. USO DE IA	27
12. REFERENCIAS	27
13. ANEXOS	30

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

FIGURA 1. PIB A PRECIOS CONSTANTES Y EMISIONES DE CO2 DE LOS JUGADORES.....	13
ECUACIÓN 1	15
ECUACIÓN 2	15
TABLA 1: DESCRIPCIÓN DE TÉRMINOS EN LA FÓRMULA DE BENEFICIOS ESPERADOS POR EMISIONES DE CARBONO	16
TABLA 2: DESCRIPCIÓN DE LOS TÉRMINOS EN LA FÓRMULA DE COSTOS ESPERADOS POR EMISIONES DE CARBONO	17
TABLA 3: DESCRIPCIÓN DE LOS TÉRMINOS DE LA FUNCIÓN DE UTILIDAD ESPERADA PARA LAS PROYECCIONES A FUTURO.	20
TABLA 4: EVOLUCIÓN PROYECTADA DE LAS VARIABLES POR JUGADOR.	21
TABLA 5: RESULTADOS DEL JUEGO PARA $t=2030$	22
TABLA 6: RESULTADOS DEL JUEGO PARA $t =2040$	23
TABLA 7: RESULTADOS DEL JUEGO PARA $t =2050$	24
TABLA A1. TÉRMINOS DE LA FUNCIÓN DE UTILIDAD PARA CHINA.....	30
TABLA A2. TÉRMINOS DE LA FUNCIÓN DE UTILIDAD PARA USA.....	31
TABLA A3. TÉRMINOS DE LA FUNCIÓN DE UTILIDAD PARA EU27	32
TABLA A4. TÉRMINOS DE LA FUNCIÓN DE UTILIDAD PARA C4	33

RESUMEN

Esta investigación analiza los incentivos económicos que influyen en la cooperación internacional frente al cambio climático, utilizando un modelo de teoría de juegos dinámico. A través de un juego repetido con horizonte infinito, se evalúan las estrategias de cuatro actores clave (Estados Unidos, China, Unión Europea y una coalición de países de ingreso medio) en tres rondas (2030, 2040, 2050), incorporando datos empíricos de PIB, emisiones de CO₂ y costos climáticos. Los resultados revelan que, aunque inicialmente prevalece la no cooperación, los crecientes impactos económicos del calentamiento global generan puntos de inflexión donde la acción colectiva se vuelve inevitable. El estudio contribuye a la literatura al superar las limitaciones de modelos estáticos, proponiendo un marco que integra asimetrías entre países y dinámicas temporales. Además, considera valores monetarios como función de utilidad para un análisis más realista y relevante.

Palabras clave: Cambio climático, teoría de juegos, cooperación internacional, negociaciones climáticas, costo social del carbono, descarbonización.

ABSTRACT

This research analyzes the economic incentives that influence international cooperation in response to climate change, using a dynamic game theory model. Through an infinitely repeated game, the strategies of four key actors—United States, China, the European Union, and a coalition of middle-income countries—are evaluated across three rounds (2030, 2040, 2050), incorporating empirical data on GDP, CO₂ emissions, and climate-related costs. The results reveal that although non-cooperation initially prevails, the growing economic impacts of global warming create inflection points where collective action becomes inevitable. This study contributes to the literature by overcoming the limitations of static models, proposing a framework that integrates both asymmetries between countries and temporal dynamics. Furthermore, it incorporates monetary values into the utility function to enable a more realistic and policy-relevant analysis.

Keywords: Climate change, game theory, international cooperation, climate negotiations, social cost of carbon, decarbonization.

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático representa uno de los mayores desafíos globales contemporáneos, con impactos económicos, sociales y ambientales. A pesar de la evidencia científica sobre sus efectos negativos, como la reducción del PIB mundial (Bilal & Känzig, 2024) y el aumento de eventos climáticos extremos (Dell et al., 2012), las negociaciones internacionales han mostrado avances limitados. El Acuerdo de París, basado en compromisos voluntarios y sin mecanismos vinculantes de cumplimiento (Seo, 2017), ejemplifica las dificultades para lograr una acción colectiva efectiva.

Este trabajo crea un puente entre la evidencia de la inacción climática y los desarrollos teóricos que investigan sus costos, mediante un marco teórico cuantitativo. Se desarrolla desde un enfoque interdisciplinario, integrando economía, relaciones internacionales y teoría de juegos. Su importancia radica en la necesidad de entender los incentivos que guían a los Estados-nación en las negociaciones climáticas. El cambio climático no solo implica pérdidas ecológicas y ambientales, sino también costos económicos directos sobre el crecimiento, el bienestar y la estabilidad social. Las decisiones climáticas deben considerarse dentro de un marco estratégico donde cada Estado actúa de acuerdo con sus propios intereses, restricciones y expectativas respecto al comportamiento de los demás.

La teoría de juegos ha sido usada para modelar negociaciones climáticas, desde versiones básicas como el dilema del prisionero hasta enfoques más complejos que introducen asimetrías entre jugadores y repeticiones en el tiempo (DeCanio & Fremstad, 2013). Sin embargo, persiste una brecha en modelos que combinen dinámicas temporales, heterogeneidad estructural y datos empíricos. Muchos enfoques continúan utilizando modelos estáticos que no capturan adecuadamente la evolución de los incentivos, ni las consecuencias acumulativas de la inacción.

El alcance de esta investigación se limita a analizar cuatro actores clave: Estados Unidos, China, la Unión Europea y una coalición de países de ingreso medio (C4), quienes representan las divergencias en emisiones históricas, nivel de ingresos y vulnerabilidad climática. Mediante un juego repetido, se proyectan tres rondas (2030, 2040, 2050) para evaluar cómo los costos económicos del cambio climático redefinen las estrategias óptimas de cada jugador. La metodología combina datos empíricos (PIB, emisiones de CO₂, costo social del carbono) con una función de utilidad construida para reflejar la relación entre los beneficios inmediatos de emitir y los costos acumulativos de la inacción climática.

Este estudio busca identificar puntos de inflexión donde la cooperación climática se vuelve inevitable. Al superar el vacío de modelos dinámicos que expliquen la inacción climática pese a sus costos económicos, la investigación aporta un avance en la teoría de juegos aplicada al clima, y un marco cuantitativo para evaluar transiciones realistas hacia economías descarbonizadas. Los resultados esperados aportan claves para reestructurar los incentivos internacionales, con el fin de acelerar acciones climáticas sostenibles y equitativas en el largo plazo.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La crisis climática supone un gran desafío para la supervivencia de la humanidad y para la estabilidad económica global en el siglo XXI. Los avances tecnológicos en mediciones de variables como la temperatura global han permitido estimar los impactos negativos de este fenómeno cada vez con más precisión. Según Bilal & Känzig (2024), el incremento de 1°C en la temperatura global está asociado con una reducción persistente del PIB mundial, que podrían alcanzar hasta un 12%, mucho más de lo anteriormente estimado.

Dell et al. (2012), señalan que este impacto se debe, en gran medida, al aumento en la intensidad y periodicidad de eventos climáticos extremos como tormentas severas, inundaciones, sequías y olas de calor. Estos eventos interrumpen la actividad económica, dañan infraestructuras y reducen la productividad en sectores clave como la agricultura y la manufactura, así como la pérdida del bienestar. En conjunto, estos efectos generan una presión significativa sobre el crecimiento económico y la estabilidad global (Dell et al., 2012). A pesar de esto, las negociaciones internacionales sobre cambio climático, como las Conferencias de las Partes (COP), han mostrado avances limitados en más de 20 años de diálogo. Actualmente, no existe un acuerdo global que trascienda un sistema basado en compromisos voluntarios, como los establecidos en el Acuerdo de París, el cual no cuenta con mecanismos de cumplimiento y carece de directrices claras (Seo, 2017).

Entre los principales obstáculos para el avance de estas negociaciones, DeCanio & Fremstad (2013) subrayan la preocupación de los países por factores como la verificación, el cumplimiento, el comportamiento de los “*free-riders*”, y el suministro energético. Estas inquietudes surgen por el carácter soberano de cada nación, donde es cuestionada la necesidad y funcionamiento de una entidad supranacional que pueda hacer cumplir lo pactado, y aplicar sanciones de ser necesario. Existe entonces, una falta de acción colectiva efectiva en las negociaciones climáticas internacionales. Desde la teoría de las relaciones internacionales, se observan comportamientos alineados con la perspectiva realista, en la que los países priorizan sus intereses y buscan maximizar su poder (DeCanio & Fremstad, 2013).

Para entender y prever las motivaciones de los agentes en estas negociaciones, es fundamental comprender su situación económica. Al dividir los agentes en bloques, es claro que el cambio climático afecta a los países de ingreso bajo y medio en mayor medida que los países de ingreso alto (Glennerster & Jayachandran, 2023). Otro factor crucial es el problema de la equidad y la justicia ambiental planteado por Seo (2017), que debate la repartición de responsabilidades, y la decisión entre liderar el paso hacia una economía con prácticas más sostenible, asumiendo los costos de inversión, o postergarla hasta que la transición sea inevitable.

Dado que los efectos negativos del calentamiento global y el cambio climático son predecibles, alarmantes y ya evidentes, resulta crucial analizar por qué las negociaciones de políticas medioambientales han sido ineficientes. De manera que surgen preguntas como: ¿Cuáles son los principales incentivos que influyen en la decisión de los agentes de cooperar o no en las negociaciones climáticas?

3. JUSTIFICACIÓN

La justificación de este trabajo radica en la importancia de abordar las negociaciones de cambio climático desde una perspectiva que integre los aspectos económicos, políticos y estratégicos. Ya que, como menciona Seo (2017), los informes de la IPCC, que son de gran importancia como marco para la toma de decisiones al posicionarse como pioneros en brindar datos creíbles sobre los efectos del cambio climático, carecen de análisis económicos rigurosos, los cuales son fundamentales para los hacedores de política encargados de la toma de decisiones. A pesar de la evidencia científica que señala los impactos económicos negativos del cambio climático, la falta de acción colectiva en las negociaciones se presenta como un problema persistente. Este trabajo busca contribuir a la comprensión de las dinámicas que subyacen a esta inacción, utilizando la teoría de juegos como herramienta para explorar los incentivos de los países para cooperar o no.

Para simplificar estos análisis, los modelos de teoría de juegos ofrecen un marco útil para modelar las interacciones estratégicas entre países, y son una herramienta comúnmente utilizada para modelar interacciones en el ámbito internacional (DeCanio & Fremstad, 2013). Estos modelos permiten explorar los incentivos que influyen en las decisiones de los agentes y su estrategia, permitiendo identificar las condiciones bajo las cuales los países estarían dispuestos a cooperar y cómo se pueden diseñar mecanismos que fomenten la acción colectiva. Este trabajo integra efectos económicos del cambio climático, cooperación internacional, y teoría de juegos, abordando un problema vigente y de importancia global. Al hacerlo, contribuye a la comprensión teórica del problema, y podría ofrecer guías útiles para diseñar políticas más efectivas que fomenten la cooperación internacional, al entender los incentivos de los estados-nación involucrados.

4. OBJETIVOS

4.1 GENERAL

Analizar los incentivos que influyen en la toma de decisiones de los estados-nación sobre cooperar o no en las negociaciones climáticas, por medio de un modelo de teoría de juegos que permita comprender las motivaciones de los agentes y los factores que han obstaculizado en la cooperación.

4.2 ESPECÍFICOS

Reportar las principales cifras del impacto global y económico que tiene el cambio climático.

Diseñar las estrategias y los pagos adecuados para un modelo de teoría de juegos con base en métricas monetarias de emisiones de carbono.

Analizar los equilibrios y las estrategias utilizadas por los estados-nación involucrados en las negociaciones de cambio climático utilizando la teoría de juegos repetidos.

Identificar escenarios de cooperación en negociaciones climáticas utilizando la teoría de juegos.

5. MARCO TEÓRICO

5.1 CAMBIO CLIMÁTICO Y EFECTOS ECONÓMICOS

Diversos estudios han explorado los efectos económicos del cambio climático, destacando los costos asociados con el calentamiento global y la necesidad de políticas eficientes para mitigar sus impactos. Uno de los primeros enfoques sistemáticos que evalúa esta cuestión fue desarrollado por Nordhaus (1992), quien propuso el modelo DICE (Dynamic Integrated Climate-Economy). Este modelo integra aspectos económicos y climáticos para determinar políticas óptimas de reducción de gases de efecto invernadero (GEI), y proyecciones de pérdidas económicas.

Nordhaus (1992) concluyó que el calentamiento global genera costos significativos, estimando que un aumento de 3°C en la temperatura podría reducir el ingreso global en aproximadamente un 1.3%. Además, su estudio reveló que políticas estrictas, como la estabilización climática, podrían implicar costos de hasta 30 billones de dólares, mientras que un enfoque moderado, como un impuesto al carbono, generaría beneficios netos de 199 mil millones de dólares. Este trabajo resaltó la importancia de equilibrar los costos de mitigación con los beneficios de evitar daños climáticos.

Por otro lado, estudios más recientes incorporan perspectivas más detalladas sobre los efectos de las variaciones de temperatura en el crecimiento económico. Dell et al. (2012), a diferencia de Nordhaus (1992), se centran en diferenciar el efecto económico según el nivel de ingreso del país evaluado. Encontraron que un aumento de 1°C en la temperatura reduce el crecimiento económico en aproximadamente 1.3 puntos porcentuales en países de ingreso bajo, mientras que en países de ingreso alto no observan efectos significativos. Este estudio destacó que los impactos negativos de la temperatura no se limitan al sector agrícola, sino que también afectan la productividad industrial, la oferta laboral y la estabilidad política.

En línea con estos hallazgos, Bilal y Känzig (2024) profundizaron en los efectos macroeconómicos del cambio climático. Subrayan que, los eventos climáticos extremos como tormentas, inundaciones y sequías no solo dañan infraestructuras, sino que también aceleran la depreciación del capital, lo que implica costos de mantenimiento mayores y una menor durabilidad de los activos físicos. Los autores utilizaron un modelo de crecimiento neoclásico basado en el modelo DICE de Nordhaus (1992), y tomando un enfoque de proyecciones locales, encontraron que un aumento de 1°C en la temperatura podría reducir la producción mundial hasta en un 12%. De esta manera, resaltan que los efectos adversos para la economía causados por el cambio climático pueden llegar a ser peores de los proyectado hasta el momento.

En contraste, (Mehrotra, 2025) se pregunta sobre los costos y el impacto de una primordial alternativa para combatir el cambio climático: la transición hacia una economía con emisiones netas cero. Aunque reconoció la incertidumbre en los costos macroeconómicos de esta transición, que podrían variar entre el 1% y el 15% del PIB dependiendo del país y el modelo utilizado, destacó que los beneficios a largo plazo son altamente significativos. Entre estos se incluyen la mitigación del cambio climático, la innovación tecnológica, mejoras en la salud pública y una mayor estabilidad económica.

al reducir la dependencia en los combustibles fósiles. Este estudio refuerza la idea de que, a pesar de los costos iniciales, la transición hacia una economía más sostenible es esencial para el desarrollo económico a largo plazo.

5.2 NEGOCIACIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO

Las negociaciones internacionales sobre el cambio climático han sido un esfuerzo colectivo que busca la mitigación y adaptación al calentamiento global (University of Cambridge, 2024). Estas negociaciones se mueven bajo el marco de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC), firmado en 1992 durante la Cumbre de la Tierra en Río de Janeiro.

Según la UNFCCC (2024), su objetivo principal es “estabilizar las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que prevenga una interferencia humana peligrosa con el sistema climático, en un plazo que permita a los ecosistemas adaptarse de forma natural” (párr 1). Para lograr este objetivo, se estableció la Conferencia de las Partes (COP), el órgano supremo de toma de decisiones de la UNFCCC, que reúne anualmente a representantes de los países miembros, conocidos como "Partes", para revisar el progreso, negociar nuevos acuerdos y establecer medidas concretas para combatir el cambio climático (UNFCCC, 2024b).

Las negociaciones climáticas comenzaron como respuesta a la creciente evidencia científica del calentamiento global, causado particularmente por las emisiones de GEI que son reportadas por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). A partir de entonces, la COP ha sido el escenario principal para la adopción de acuerdos internacionales clave, que buscan establecer compromisos vinculantes o voluntarios para reducir las emisiones de GEI y limitar el aumento de la temperatura global, como el Protocolo de Kioto en 1997 y el Acuerdo de París en 2015 (UNFCCC, 2024c).

Aunque las negociaciones han tenido resultados significativos como establecer marcos globales para la acción climática, muchos expertos argumentan que han fallado en alcanzar sus objetivos principales (Seo, 2017). Entre los factores que impide el avance de lo pactado, Seo (2017) resalta la falta de cumplimiento efectivo de los compromisos adquiridos por las partes. En el caso del Acuerdo de París, la autora recalca que, dado su enfoque voluntario no hay mecanismos de cumplimiento vinculantes, lo que crea una brecha entre el compromiso de reducción de emisiones y su implementación.

Seo (2017) resalta otro factor que ha impedido el avance de las negociaciones, y es la divergencia de intereses y la división de responsabilidades entre países de ingreso alto e ingreso bajo. Los países de ingreso bajo argumentan que las naciones industrializadas son responsables de la mayor parte de las emisiones de GEI, por lo que deben asumir una mayor carga financiera y de reducción. Esta idea es soportada por Lucon et al., (2013), quienes resaltan que las economías emergentes necesitan espacio para crecer económicamente antes de implementar medidas más estrictas, que podrían disminuir el ritmo de crecimiento económico y volverlos menos competitivos.

Además, Glennerster y Jayachandran (2023) destacan las barreras económicas y políticas que muchos países de ingreso bajo y medio enfrentan para adoptar medidas de mitigación. Los autores recalcan que, en el ámbito económico los costos de implementación suelen estar subestimados, y el acceso limitado al capital dificulta la inversión en tecnologías limpias. Para el ámbito político, los autores identifican que la resistencia de actores influyentes, como sectores industriales y grupos de interés, ha frenado la adopción de políticas ambientales eficaces Glennerster y Jayachandran (2023). Así mismo, esta idea se relaciona con DeCanio & Fremstad (2013) quienes identificaron la dependencia global de los combustibles fósiles, que hace que los países prioricen su poder económico sobre la transición energética, como otro factor relevante.

En respuesta a esto, se hizo la promesa de 100.000 millones de dólares anuales a través del Fondo Verde para el Clima (GCF), que busca apoyar las iniciativas de los países de ingreso bajo para responder al cambio climático, a través del financiamiento de lo planteado en sus propuestas para las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDCs) (Green Climate Fund, 2024). Aun así, esta iniciativa ha generado tensiones debido a la falta de cumplimiento, y eficiencia en su entrega (Glennerster & Jayachandran, 2023).

Tanto Seo (2017), como Lucon et al. (2013), argumentan que la falta de enfoque colectivo y cooperación efectiva, han llevado a que los esfuerzos internos de cada parte, descritos en las NDCs, no sean suficientes para mantener el calentamiento global por debajo de los 2°C como lo establece el acuerdo de París. Por otro lado, Wood (2011), Hsu (2012), DeCanio & Fremstad (2013), y Preethi et al. (2019) subrayan otro grande desafío en las negociaciones: el comportamiento de "*free-rider*", donde algunas partes se benefician de los esfuerzos de otros sin reducir sus propias emisiones. Esta situación aumenta los costos de mitigación para las partes comprometidas con la reducción de emisiones, hace que los procesos sean menos óptimos, y genera tensiones.

Finalmente, la falta de armonización en la medición y monitoreo de políticas climáticas ha limitado su efectividad. Según Lucon et al. (2013), la ausencia de un sistema global coherente para evaluar y comparar los esfuerzos de reducción de emisiones ha llevado a una implementación desigual y, en muchos casos, insuficiente.

5.3 TEORÍA DE JUEGOS EN NEGOCIACIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO

La teoría de juegos ha sido ampliamente utilizada para modelar las negociaciones internacionales sobre el cambio climático, ofreciendo un marco analítico para entender las interacciones estratégicas entre los países. Uno de los primeros enfoques para modelar las negociaciones climáticas fue el Dilema del Prisionero, que ilustra el debate entre la cooperación y el interés individual. En este modelo, cada parte tiene un incentivo para no reducir sus emisiones (traicionar los acuerdos), ya que los beneficios de la mitigación son compartidos globalmente, mientras que los costos son asumidos individualmente, como fue mencionado anteriormente para el caso del "*free riding*".

Este enfoque utilizado por Kopec (2017), quien argumentó que las negociaciones climáticas a menudo se modelan como una Tragedia de los Comunes, donde los países,

actuando en su propio interés, sobreexplotan un recurso común que en este caso deteriora la atmósfera, lo que lleva a un resultado subóptimo para todos. Sin embargo, Kopec (2017) critica este modelo por ser una "profecía autocumplida", ya que la creencia de que los países actuarán de manera egoísta aumenta la probabilidad de que lo hagan.

Por el contrario, DeCanio y Fremstad (2013) proponen un análisis más exhaustivo de los juegos que pueden ser utilizados en este marco, utilizando la "Nueva Tabla Periódica" de juegos de 2x2. Identifican 25 juegos potencialmente relevantes, incluyendo el Dilema del Prisionero, La caza del Ciervo, y el Juego de Coordinación. Los autores argumentan que no hay razón para asumir que el Dilema del Prisionero es la mejor descripción de las negociaciones climáticas, ya que otros juegos, como el Juego de Coordinación, pueden ofrecer equilibrios más favorables donde la cooperación es posible.

De esta manera, el Juego de Coordinación ha sido destacado como un modelo más optimista para las negociaciones climáticas. En este, los países tienen altos incentivos para cooperar cuando notan que los riesgos del cambio climático son considerados altamente graves. DeCanio y Fremstad (2013) señalan que, en este tipo de juegos, la cooperación puede lograrse a través de la diplomacia inteligente y la comprensión de los riesgos climáticos. Sin embargo, este modelo depende de la capacidad de los países para coordinar sus acciones y cambiar la percepción sobre la urgencia del problema.

En línea con esto, Wood (2011) explora la formación de coaliciones como un mecanismo para fomentar la cooperación, ya que resalta la dificultad de negociar y llegar a acuerdos en espacios con tantas partes involucradas. Argumenta que los juegos cooperativos, donde los países forman coaliciones para reducir emisiones, pueden ser más efectivos que los modelos no cooperativos. Sin embargo, Wood (2011) también reconoce que la formación de coaliciones enfrenta desafíos, como la posibilidad del *free-riding*, y los conflictos de interés entre coaliciones.

Dada la complejidad de las negociaciones climáticas, los modelos estáticos como el Dilema del Prisionero y el Juego de Coordinación han sido criticados por no capturar adecuadamente la dinámica temporal y la incertidumbre. Madani (2013) argumenta que los modelos de teoría de juegos deben ser dinámicos y considerar la información incompleta, ya que las decisiones de los países no se toman en un vacío, sino en respuesta a las acciones de otros y a la evolución de la información científica. El autor destaca la importancia de la caracterización de los jugadores como países que interactúan entre sí, además de la necesidad de modelar las negociaciones con más de una ronda, para abrir la posibilidad de que hayan contraacciones y de que los jugadores puedan cambiar de opinión a lo largo del juego.

Por su parte, Hsu (2012) propone el modelo WITCH, que aplica la división de las partes en coaliciones como sugerido por Wood, e incorpora decisiones teóricas de juegos en dos etapas: una etapa de formación de coaliciones y otra de elección de niveles óptimos de emisiones. Sin embargo, Hsu (2012) reconoce que el modelo no explora suficientemente cómo cambiarían los resultados si se alteraran los supuestos teóricos, lo que limita su capacidad para capturar la complejidad de las negociaciones reales dado el constante cambio de evidencia científica y relaciones internacionales. Además, deja como recomendación la modelación de un juego con más de dos agentes.

6. DISEÑO METODOLÓGICO

Para representar las interacciones de los países en el marco de las negociaciones internacionales sobre cambio climático, se utilizará la teoría de juegos como metodología. Se busca representar las interacciones de los agentes a lo largo del tiempo, a través de la construcción de un juego repetido, considerando aspectos cualitativos y cuantitativos. Con base a lo expuesto en el marco teórico, se considera que un juego repetido es el enfoque que más se acerca a la realidad. Este tipo de juego permite un análisis dinámico, e incorpora los efectos a largo plazo, brindando la oportunidad de que los jugadores modifiquen sus estrategias en la marcha.

Para desarrollar el modelo, es necesario definir cuidadosamente a los jugadores, sus estrategias y su función de utilidad. Uno de los mayores desafíos al modelar negociaciones internacionales es la construcción de una función de utilidad que refleje la evolución de los beneficios con el paso del tiempo, y facilite la convergencia hacia un equilibrio cooperativo. Adoptar un sistema de pagos poco representativo o alejado de la realidad resta impacto y robustez al juego. Como señalan Preethi et al. (2019), es necesario plantear un esquema de pagos que muestre de manera explícita las transferencias financieras y que permita equilibrar y comparar costos y beneficios.

En este sentido, se construirá una función de utilidad esperada que refleje los efectos de las emisiones de CO₂ en términos monetarios. Para esto, se utilizarán las emisiones de CO₂ de los jugadores, su PIB, las fluctuaciones de temperatura anuales, y un factor de descuento temporal basado en el estudio de Bilal & Känzig (2024).

7. DESARROLLO DEL JUEGO

A continuación, se presenta el planteamiento y las características del juego repetido desarrollado, con el fin de plasmar las dinámicas de algunos países en negociaciones internacionales sobre cambio climático como la conferencia de las partes (COP), donde se modelan a través de la teoría de juegos, las decisiones estratégicas de los jugadores, teniendo en cuenta los costos económicos de estas.

Los juegos repetidos son situaciones en las que un mismo juego se realiza múltiples veces por los mismos jugadores, esto introduce dinámicas estratégicas más completas, ya que se puede considerar el historial de acciones pasadas para decidir sus movimientos futuros (Leyton-Brown & Shoham, 2008). Cuando el juego se repite infinitamente o con un número de repeticiones incierto, las dinámicas del análisis cambian, al no existir una última ronda, se evita el razonamiento inductivo hacia atrás que lleva a equilibrios poco cooperativos en juegos finitos. Para el desarrollo de este trabajo esta característica es de suma importancia, ya que el cambio climático es un problema global que requiere soluciones coordinadas y cooperativas.

7.1 JUGADORES

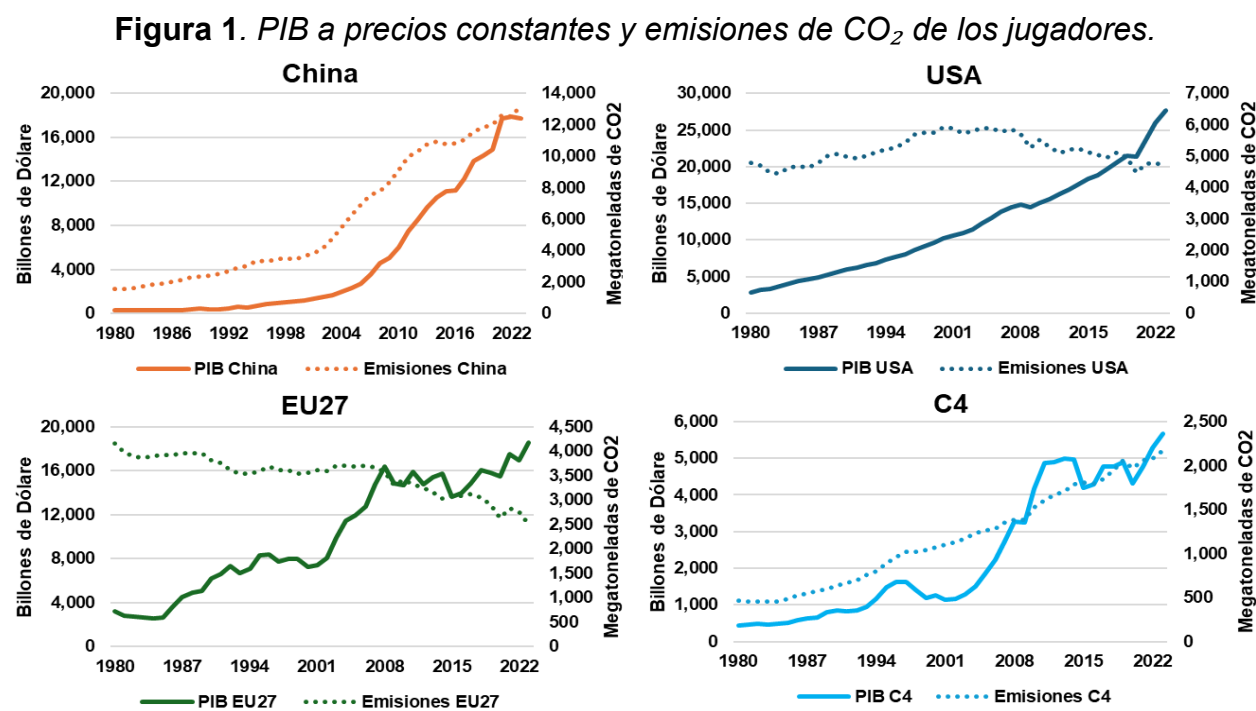
Para definir a los jugadores, se tomaron en cuenta las recomendaciones de Wood (2011) y Hsu (2012), quienes mencionan la importancia de modelar negociaciones internacionales con más de 2 jugadores y tener en cuenta coaliciones de países que tengan características e incentivos a desviarse similares. De esta manera, el conjunto de jugadores es definido como:

$$N = \{\text{Estados Unidos, China, Unión Europea, Coalición 4}\}$$

$$N = \{\text{USA, China, EU27, C4}\}$$

El cuarto jugador es una coalición creada para este ejercicio llamada “la coalición 4”, está conformada por países latinoamericanos y asiáticos que se encuentran cerca de la línea del Ecuador, propiciando climas tropicales que históricamente les han permitido ser intensivos en actividades de agricultura. Así mismo, están clasificados como países de ingreso medio según el INB per cápita del Banco Mundial (2025). Dada la condición geográfica y económica de estos países, Glennerster & Jayachandran (2023) señalan que son más vulnerables ante el cambio climático, ya que enfrentan una mayor exposición a eventos climáticos adversos que afectan directamente la actividad agrícola, la infraestructura, y cuentan con una capacidad limitada para adaptarse o reparar los daños debido a restricciones de recursos. La coalición 4 está conformada por: Brasil, Colombia, Ecuador, Filipinas, Indonesia, Perú, Tailandia, y Vietnam.

Con el fin de entender mejor a los jugadores, a continuación, en la Figura 1 se presenta información sobre su PIB y emisiones anuales.



Nota. Elaboración propia con datos del FMI (2025) y EDGAR (2024).

La Figura 1 muestra la evolución histórica del PIB y las emisiones de CO₂ de cada jugador desde 1980 hasta 2023. China se posiciona como el mayor emisor de este gas a nivel mundial, destaca por un crecimiento económico acelerado, especialmente desde inicios de los años 2000, acompañado de un incremento igualmente rápido en sus emisiones, lo que refleja una fuerte dependencia del carbono como motor de su desarrollo. Esta relación entre crecimiento y emisiones hace que China sea un actor central en cualquier acuerdo climático, pues sus decisiones tienen un peso significativo en el resultado global del juego. Por otro lado, Estados Unidos (USA) presenta un crecimiento económico sostenido y, aunque su reducción de emisiones ha sido gradual, para 2022 ya había logrado retornar a niveles similares a los de la década de 1980. Esta trayectoria sugiere un proceso de descarbonización paulatino, pero consistente, lo que otorga una posición estratégica en escenarios de transición lenta.

La Unión Europea (EU27) resalta por haber logrado desacoplar parcialmente su crecimiento económico de las emisiones, ya que, desde mediados de los noventa, su PIB continúa aumentando mientras sus emisiones disminuyen sostenidamente. Esta es evidencia de su compromiso con la reducción de GEI y liderazgo en el área de transición a fuentes de energía renovables y prácticas sostenibles. En contraste, la Coalición 4 (C4) muestra un crecimiento más moderado pero constante, acompañado de un aumento sostenido en sus emisiones, lo que sugiere un patrón de desarrollo aún intensivo en carbono. Esta combinación de vulnerabilidad climática y dependencia económica del carbono hace que la coalición se mueva entre la urgencia de reducir emisiones y las limitaciones para el desarrollo y adaptación.

La elección de estos cuatro jugadores clave permite crear un escenario de negociaciones asimétricas donde se consideran tres aspectos fundamentales: los países con mayores emisiones históricas y actuales de CO₂, aquellos con compromisos de reducción de emisiones y un proceso ya notorio, y el impacto de las diferencias en sus niveles de ingreso. Esta combinación de características heterogéneas refleja cómo las trayectorias históricas de cada nación condicionan sus estrategias disponibles en el juego. De esta manera el análisis logra capturar la complejidad real de las negociaciones climáticas.

7.2 ACCIONES

En cada ronda del juego, los jugadores se enfrentan a la decisión de reducir sus emisiones o continuar contaminando. Cada acción afecta el desempeño propio en el corto plazo, y tiene repercusiones acumulativas a lo largo del tiempo, impactando tanto a su propia economía como la de los demás jugadores. El conjunto de acciones de los jugadores está definido como:

$$A = \{Reducir, Contaminar\}$$

$$A = \{R, C\}$$

Decidir contaminar implica que el jugador prioriza beneficios económicos inmediatos a costa de mayores emisiones de CO₂. Esta decisión contribuye al incremento de la

temperatura global, generando externalidades negativas que afectan a todos los jugadores al aumentar los riesgos y costos del cambio climático.

Por otro lado, la acción de reducir refleja un esfuerzo por transitar hacia una economía descarbonizada, donde el jugador disminuye progresivamente su dependencia del carbono. Esta decisión conlleva beneficios a largo plazo tanto a nivel económico como medioambiental, ya que las tecnologías renovables y limpias pueden disminuir los costos operativos y aumentar la resiliencia económica, promoviendo un crecimiento sustentable y una economía más diversificada y menos vulnerable a los choques del mercado de combustibles fósiles (Mehrotra, 2025).

7.3 FUNCIÓN DE PAGOS

La función de utilidad de este modelo fue diseñada con el fin de capturar en términos monetarios los principales costos y beneficios que enfrentan los jugadores al tomar decisiones sobre políticas ambientales que impliquen la reducción de emisiones de CO₂. Esta función expresa el resultado en billones de dólares, permitiendo así una comparación directa en una escala relevante, las distintas estrategias y escenarios dispuestas para los Estado-nación. De esta manera, se proporciona una medida tangible del impacto económico de cada elección, lo que facilita el análisis de los incentivos que guían el comportamiento de los jugadores como fue recomendado por Preethi et al. (2019).

Así, la función busca reflejar los dilemas reales que enfrentan los jugadores. Por un lado, los beneficios inmediatos derivados de actividades económicas emisoras de carbono que históricamente se han visto relacionadas con el crecimiento del PIB de un país y los llevan a tener economías intensivas en el uso de carbono, y por otro, los costos de largo plazo asociados al cambio climático, como la pérdida de productividad, infraestructura y salud pública. Así mismo, la función encapsula el dilema de la transición a economías descarbonizadas al tener en cuenta qué tan dependientes son estas a las actividades carbono intensivas y cómo esta dependencia disminuye a medida que un país decide optar por alternativas más sostenibles. Así, la utilidad representa un balance entre las ganancias a corto plazo y las consecuencias negativas que se acumulan con el tiempo.

De esta manera, la función de utilidad esperada de los jugadores (i) en el periodo (t) está definida como:

$$\text{Ecuación 1: } U_{i,t}^E = B(e_{i,t}) - (SCC_{i,t} + PIB_i(T_t))$$

Que puede ser interpretada como los beneficios de emitir CO₂ – los costos de emitir CO₂, donde:

$$\text{Ecuación 2: } U_{i,t}^E = \lambda PIB_{i,t} \left(\frac{e_{i,t}}{E_i}\right)^\alpha - (e_{i,t} \delta_t + PIB_{i,t} \beta T_t)$$

Con el fin de propiciar el entendimiento de esta función de utilidad esperada, en la tabla 1 se presenta una descripción detallada de cada término que compone la primera parte de la función que responde a los beneficios, y en la tabla 2 se explican los términos de los costos, así como su unidad de medida y fuente de datos.

Tabla 1. Descripción de términos en la fórmula de beneficios esperados por emisiones de Carbono (Ecuación 2 primera parte)

$$U_{i,t}^E = \lambda PIB_{i,t} \left(\frac{e_{i,t}}{E_i} \right)^\alpha - (e_{i,t} \delta_t + PIB_{i,t} \beta T_t)$$

Término	Definición	Unidad de medida	Detalles	Fuente
λ_i	Parámetro que muestra la carbono intensidad de la economía del jugador i (proxy)	-	Este parámetro indica qué porcentaje del PIB de un país está directamente asociado a la producción de CO ₂ . Se calcula como el promedio de la intensidad de carbono (en kgCO ₂ /US\$) del país i entre los años 2014 y 2023. Para hacerlo comparable con el PIB en billones de dólares, se realiza una transformación proporcional. Se utiliza como un multiplicador del PIB para estimar el beneficio económico asociado a las emisiones.	Proxy basada en datos de Enerdata (2024).
$PIB_{i,t}$	Producto Interno Bruto del jugador i en el periodo t	Billones de dólares a precio corriente	Representa el valor total de los bienes y servicios producidos por el jugador i en el período t . Es utilizado como base para calcular los beneficios económicos derivados de la actividad que genera emisiones de CO ₂ .	Fondo Monetario Internacional (2025).
$e_{i,t}$	Emisiones de CO ₂ del jugador i en el periodo t	Megatoneladas de CO ₂	Corresponde a la cantidad total de CO ₂ emitida por el jugador i durante el período t . Estas emisiones son el insumo principal para determinar los beneficios y también los costos climáticos.	EDGAR Base de datos de emisiones para la Comunidad de Investigación Atmosférica Global Base de datos de GEI (M et al., 2024)
$E_{i,t}$	Promedio móvil de los últimos 10 años de emisiones de CO ₂ del jugador i	Megatoneladas de CO ₂	El promedio móvil se calcula cada década. Para los cálculos de los beneficios de 2030 se utilizó el promedio de las emisiones desde 2020 hasta 2029. Para los beneficios de 2040 se utilizó el promedio de las emisiones desde 2030 hasta 2039, y así para cada ronda.	Cálculos propios con datos de EDGAR Base de datos de emisiones para la Comunidad de Investigación Atmosférica Global Base de datos de GEI (M et al., 2024)
$\alpha_{i,t}$	Parámetro de elasticidad que refleja los rendimientos marginales de las emisiones (proxy)	-	Este parámetro controla cómo varía el beneficio económico marginal a medida que un país emite más CO ₂ . Siendo un exponente entre 0 y 1, captura la existencia de rendimientos decrecientes: a mayor nivel de emisiones relativas $\left(\frac{e_{i,t}}{E_i} \right)$ menor es el beneficio adicional obtenido. Se construye como proxy, usando la proporción de emisiones provenientes de sectores intensivos en carbono (energía y transporte), a partir de datos sectoriales.	Proxy basada en datos de las emisiones por sector de EDGAR Base de datos de emisiones para la Comunidad de Investigación Atmosférica Global Base de datos de GEI (M et al., 2024)

Tabla 2. Descripción de los términos en la fórmula de costos esperados por emisiones de Carbono (Ecuación 2 segunda parte)

$$U_{i,t}^E = \lambda PIB_{i,t} \left(\frac{e_{i,t}}{E_i} \right)^\alpha - (e_{i,t} \delta_t + PIB_{i,t} \beta T_t)$$

Término	Definición	Unidad de medida	Detalles	Fuente
δ_t	Multiplicador del Costo Social del Carbono (SCC) en el periodo t	-	Este parámetro permite calcular el valor monetario, en billones de dólares, de cada megatonelada de CO ₂ emitida por el jugador i en el período t. Se basa en el Costo Social del Carbono (SCC), que estima el daño neto a la sociedad por emitir una tonelada de CO ₂ . El valor inicial se toma de la EPA (en dólares de 2020), se ajusta a precios constantes usando la calculadora de inflación de la Oficina de Estadísticas Laborales de EE. UU., y luego se actualiza anualmente con una tasa de descuento dada por la EPA del 1.5% para reflejar el valor presente de los impactos futuros del cambio climático. Finalmente, se convierte a las unidades del modelo dividiendo entre 1000.	Cálculos propios con datos del Manual de trabajo para la aplicación de estimaciones de GEI de la EPA (2024) y la calculadora de inflación de la Oficina de estadísticas laborales de EE. UU. (U.S. Bureau of Labor Statistics, 2025).
β	Proxy de costos del cambio climático como porcentaje del PIB	-	Se construye como un parámetro constante a partir de Bilal & Känzig (2024), quienes estiman que un aumento de 1°C puede generar una pérdida persistente del PIB de hasta un 12%. Este valor se utiliza como multiplicador del aumento de temperatura para estimar la pérdida anual asociada al cambio climático.	The Macroeconomic Impact of Climate Change: Global vs. Local Temperature (Bilal & Känzig, 2024)
T_t	Aumento de la temperatura	Grados centígrados	Las temperaturas se reportan como anomalías respecto al promedio del período 1951–1980, definido como base preindustrial según la metodología del IPCC. Se usa como insumo clave para estimar los impactos climáticos en el PIB. Al multiplicarlo por β , se obtiene el porcentaje de pérdida del PIB asociado al calentamiento global acumulado.	The Berkeley Earth Land/Ocean Temperature Record (Rohde & Hausfather, 2025)

Como se observa en la tabla 1, la primera parte de la función de utilidad busca capturar los beneficios económicos derivados de emitir CO₂. Está compuesta por tres elementos clave, el tamaño de la economía medida por el PIB, la intensidad de carbono de esa economía representada por λ_i , y la relación entre las emisiones actuales del jugador ($e_{i,t}$) y su propio promedio histórico de emisiones (E_i), elevada a un parámetro de elasticidad α_i .

Esta última relación, $(\frac{e_{i,t}}{E_i})^\alpha$, permite capturar cómo la magnitud de las emisiones actuales se compara con el comportamiento histórico del jugador. Si un país emite por encima de su media histórica, se interpreta como una intensificación en el uso del carbono, lo cual genera mayores beneficios inmediatos, pero también refleja una mayor dependencia de los combustibles fósiles. En cambio, si las emisiones actuales son inferiores al promedio, los beneficios se reducen, reflejando una transición hacia una economía más descarbonizada.

El parámetro α_i permite modelar la sensibilidad de los beneficios a esta proporción, cuanto mayor sea α_i , mayor será la variación en los beneficios cuando un país aumenta su nivel de emisiones, por otro lado, entre menor sea α_i , los beneficios de contaminar crecen a un ritmo cada vez menor. Por su parte, λ_i representa qué tanto depende del carbono una economía para crecer y ser productiva. Una economía con alto λ_i obtiene más beneficios por emitir, mientras que una con bajo λ_i puede producir valor emitiendo menos. De esta manera, la función de utilidad refleje las diferencias estructurales entre países y su dependencia relativa al uso del carbono, elementos cruciales en la toma de decisiones en negociaciones climáticas.

La segunda parte de la función de utilidad es descrita en la tabla 2, esta representa los costos económicos que enfrentan los jugadores como consecuencia de sus propias emisiones y del impacto acumulado del cambio climático a nivel global. Esta sección incorpora parámetros dinámicos que evolucionan a lo largo del tiempo, como la temperatura o el valor descontado del SCC, para reflejar el aumento progresivo del costo de la inacción climática. Estos costos se dividen en dos partes.

La primera es el daño directo asociado a las emisiones propias, que se mide multiplicando las emisiones del jugador ($e_{i,t}$) por el valor monetario del Costo Social del Carbono (δ_t). Este valor refleja el daño económico estimado en términos de salud, productividad agrícola, daños por desastres naturales, entre otros, que provoca la emisión de una tonelada de CO₂ en un año específico. El segundo componente modela las pérdidas proyectadas del PIB como resultado del aumento de la temperatura global. Este costo se calcula como una proporción fija (β) del PIB, multiplicada por el aumento en la temperatura proyectado para ese año (T_t).

7.4 RONDAS Y SUPUESTOS

Dado que el presente juego es repetido, lo que le da un carácter dinámico, es necesario realizar proyecciones de la función de utilidad hacia periodos de tiempo futuros. La naturaleza de un juego repetido exige que los jugadores no tomen decisiones de manera aislada en cada momento, sino que puedan observar tanto las consecuencias de sus

acciones pasadas como anticipar las posibilidades futuras, adaptando su comportamiento estratégicamente a medida que se desarrolla el juego. Así, para poder modelar de manera realista las trayectorias de la toma de decisiones, se establecieron tres rondas para el análisis, las cuales son: 2030, 2040 y 2050. Estas rondas permiten mostrar cómo las dinámicas de costos y beneficios evolucionan, condicionando las decisiones de los jugadores entre rondas.

Es de suma importancia recordar que, en este contexto las decisiones de un jugador no sólo afectan su propia situación, sino también la de los demás. Las emisiones de gases de efecto invernadero tienen un carácter acumulativo y global, de modo que el comportamiento de cada jugador tiene un efecto en el aumento de la temperatura mundial, afectando los costos asociados al cambio climático para todos los agentes. Este efecto es capturado en el modelo mediante la evolución de la temperatura global, ya que a medida que un mayor número de jugadores elige seguir contaminando, la temperatura aumenta más rápidamente, incrementando así los efectos negativos del cambio climático sobre las economías. Este supuesto enfatiza el dilema de la inacción, donde si los jugadores priorizan los beneficios individuales a corto plazo de contaminar, el deterioro ambiental llevará inevitablemente a un escenario en el que los costos climáticos superen cualquier beneficio económico de emitir CO₂. Cuanto más elevada sea la temperatura global, mayor será la pérdida de PIB y más severo será el impacto en el bienestar de todos los jugadores.

Por otro lado, cuando los jugadores optan por reducir sus emisiones, el aumento de la temperatura se modera, lo que ayuda a contener los efectos más nocivos del cambio climático. Sin embargo, esto introduce el fenómeno del *free riding*. En este caso, los países que eligen seguir contaminando igualmente se benefician de las reducciones logradas por quienes sí decidieron actuar. Esta posibilidad de aprovecharse de los esfuerzos ajenos sin contribuir genera tensiones adicionales en la dinámica de cooperación internacional, reforzando la complejidad del dilema planteado.

De esta manera, las rondas del juego permiten ver el supuesto de que, si los jugadores continúan contaminando se llega a un escenario catastrófico, por lo que resultará evidente que los agentes tienen un incentivo real para modificar su estrategia y comenzar a mitigar, no sólo como respuesta a los costos crecientes, sino también como parte de una transición estructural hacia economías descarbonizadas. Esta transición implicaría el abandono progresivo de la dependencia a los combustibles fósiles y a actividades altamente intensivas en carbono, lo cual, reflejado en la función de utilidad, se traduce en una disminución paulatina de los beneficios económicos derivados de la contaminación.

A continuación, en la Tabla 3 se describen las transformaciones realizadas para cada término de la función de utilidad, condicionadas por las decisiones de los jugadores y proyectando su impacto en las rondas futuras. Posteriormente, en la Tabla 4 se presenta la aplicación específica de estas transformaciones, mostrando cómo afectan de manera individual a cada jugador.

Tabla 3. Descripción de los términos de la función de utilidad esperada (ecuación 2) para las proyecciones a futuro.

$$U_{i,t}^E = \lambda PIB_{i,t} \left(\frac{e_{i,t}}{E_i} \right)^\alpha - (e_{i,t} \delta_t + PIB_{i,t} \beta T_t)$$

Término	Definición	Cálculo y supuestos
$e_{i,t}$ (Reducir)	Emisiones de CO ₂ del jugador i en el periodo t bajo la acción de reducir emisiones.	Se calcula aplicando el promedio del cambio porcentual de las emisiones de los últimos 10 años, ajustado según la decisión de mitigar o contaminar.
$e_{i,t}$ (Contaminar)	Emisiones de CO ₂ del jugador i en el periodo t bajo la acción de contaminar.	
$PIB_{i,t}$	Producto Interno Bruto del jugador i en el periodo t.	Se supone una tasa de crecimiento anual constante, basada en las proyecciones económicas del Fondo Monetario Internacional (2025b)
$\lambda_{i,t}$ (Reducir)	Parámetro que muestra la carbono intensidad de la economía del jugador i en el periodo t bajo la acción de reducir emisiones (proxy).	Disminuye en 0,01 unidades por periodo, reflejando la reducción progresiva de la dependencia al carbono, suponiendo que esto significa que el jugador transiciona hacia fuentes energéticas alternativas.
λ_i (Contaminar)	Parámetro que muestra la carbono intensidad de la economía del jugador i (proxy).	Permanece constante en el tiempo si el jugador decide no reducir emisiones, indicando la continuidad de su dependencia al carbono.
$E_{i,t}$ (Reducir)	Promedio móvil de los últimos 10 años de emisiones de CO ₂ del jugador i en el periodo t bajo la acción de reducir emisiones.	Se calcula el promedio en base a $e_{i,t}$ (Reducir) en los últimos 10 años.
$E_{i,t}$ (Contaminar)	Promedio móvil de los últimos 10 años de emisiones de CO ₂ del jugador i en el periodo t bajo la acción de contaminar.	Se calcula el promedio en base a $e_{i,t}$ (Contaminar) en los últimos 10 años
$\alpha_{i,t}$ (Reducir)	Parámetro de elasticidad que refleja los rendimientos marginales de las emisiones en el periodo t bajo la acción de reducir emisiones (proxy).	Disminuye en 0,01 unidades por periodo cuando el jugador decide reducir, indicando que los beneficios económicos de contaminar disminuyen progresivamente.
α_i (contaminar)	Parámetro de elasticidad que refleja los rendimientos marginales de las emisiones en el periodo t bajo la acción de contaminar (proxy).	Se mantiene constante cuando el jugador decide no mitigar, reflejando la persistencia de los beneficios asociados a una economía intensiva en carbono.
δ_t	Multiplicador del Costo Social del Carbono (SCC) en el periodo t.	Se actualiza aplicando una tasa de descuento del 1,5%, para reflejar el aumento proyectado en los costos sociales de las emisiones.
β	Proxy de costos del cambio climático como porcentaje del PIB.	Se mantiene constante con el tiempo.
T_t (Reducir)	Aumento de la temperatura global.	Se calcula en base al promedio del aumento en los últimos 10 años, suponiendo que incluso con mitigación, la temperatura sigue aumentando debido a los efectos que ya se observan del cambio climático.
$T1_t$	Aumento de la temperatura global cuando 1 jugador decide contaminar.	Se suma 0,001°C adicionales a T_t (Reducir), mostrando el impacto adicional por la contaminación de un solo jugador.
$T2_t$	Aumento de la temperatura global cuando 2 jugadores deciden contaminar.	Se suma 0,002°C adicionales a T_t (Reducir), mostrando el efecto acumulativo de dos jugadores contaminando.
$T3_t$	Aumento de la temperatura global cuando 3 jugadores deciden contaminar.	Se suma 0,003°C adicionales a T_t (Reducir), representando el deterioro climático por las decisiones colectivas de tres jugadores.
$T4_t$	Aumento de la temperatura global cuando 4 jugadores deciden contaminar.	Se suma 0,004°C a T_t (Reducir), encapsulando el impacto máximo de la inacción, donde los 4 jugadores contaminan.

Nota. Los datos base para el cálculo de cada proyección corresponden a las mismas fuentes presentadas en las Tablas 1 y 2.

Tabla 4: Evolución proyectada de las variables de la ecuación 2 por jugador.				
$U_{i,t}^E = \lambda PIB_{i,t} \left(\frac{e_{i,t}}{E_i}\right)^\alpha - (e_{i,t} \delta_t + PIB_{i,t} \beta T_t)$				
Término	China	USA	EU27	C4
$e_{i,t}$ (Reducir)*	$e_{t-1} - (e_{t-1} \times 0.01)$	$e_{t-1} - (e_{t-1} \times 0.01)$	$e_{t-1} - (e_{t-1} \times 0.02)$	$e_{t-1} - (e_{t-1} \times 0.01)$
$e_{i,t}$ (Contaminar)**	$e_{t-1} \times 1.02$	$e_{t-1} \times 1.01$	$e_{t-1} \times 1.01$	$e_{t-1} \times 1.02$
$PIB_{i,t}$	$PIB_{t-1} \times 1.045$	$PIB_{t-1} \times 1.021$	$PIB_{t-1} \times 1.014$	$PIB_{t-1} \times 1.045$
$\lambda_{i,t}$ (Reducir)	$\lambda_{t-1} - (\lambda_{t-1} \times 0.01)$			
$\lambda_{i,t}$ (Contaminar)	<i>0.50</i>	<i>0.27</i>	<i>0.16</i>	<i>0.19</i>
$E_{i,t}$ (Reducir)	<i>Promedio entre t - 11 y t - 1 de $e_{i,t}$ (Reducir)</i>			
$E_{i,t}$ (Contaminar)	<i>Promedio entre t - 11 y t - 1 de $e_{i,t}$ (Contaminar)</i>			
$\alpha_{i,t}$ (Reducir)	$\alpha_{t-1} - (\alpha_{t-1} \times 0.01)$			
α_i (contaminar)	<i>0.7</i>	<i>0.6</i>	<i>0.5</i>	<i>0.8</i>
δ_t	$0.43 \times 1.015^{t-2024}$			
β	<i>12%</i>			
T_t (Reducir)	$T_{t-1} + 0.052$			
$T1_t$	$T_{t-1} + 0.053$			
$T2_t$	$T_{t-1} + 0.054$			
$T3_t$	$T_{t-1} + 0.055$			
$T4_t$	$T_{t-1} + 0.056$			

Nota. Los datos base para el cálculo de cada proyección corresponden a las mismas fuentes presentadas en las Tablas 1 y 2.

*El promedio de la variación anual de las emisiones de USA y de EU27 son decrecientes, respectivamente -1% y -2%, explicando que decrezcan en esta medida, para China y para C4 se eligió un cambio de -1% para mantener sus esfuerzos al mínimo dadas sus decisiones históricas.

**El promedio de la variación anual de las emisiones de China y de C4 son crecientes, siendo 2% para cada uno. Para USA y EU27 se eligió un cambio de 1% para no penalizar su tendencia a la disminución.

Los cálculos detallados de las proyecciones presentadas en esta sección, incluyendo las fórmulas aplicadas para cada variable y los parámetros específicos por jugador, se encuentran desarrollados extensivamente en los Anexos (Tablas A1, A2, A3 y A4). Allí se documenta el proceso completo de construcción de las funciones de utilidad, con los ajustes metodológicos realizados, permitiendo la replicabilidad del modelo.

8. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos al aplicar la función de utilidad propuesta en un juego repetido para $t \in (2030, 2040, 2050)$, donde i toma los valores del conjunto de jugadores N anteriormente establecido.

Tabla 5. Resultados del juego para $t = 2030$							
CHINA	USA	EU27	C4	U^E China	U^E USA	U^E EU27	U^E C4
C	C	C	C	1,128	332	-2,184	-1,113
C	C	C	R	1,147	358	-2,167	-1,156
C	C	R	C	1,147	358	-2,378	-1,125
C	C	R	R	1,165	384	-2,361	-1,150
C	R	C	C	1,147	-418	-2,167	-1,125
C	R	C	R	1,165	-392	-2,150	-1,150
C	R	R	C	1,165	-392	-2,361	-1,119
C	R	R	R	1,184	-366	-2,344	-1,144
R	C	C	C	621	358	-2,167	-1,125
R	C	C	R	639	384	-2,150	-1,150
R	C	R	C	639	384	-2,361	-1,119
R	C	R	R	658	410	-2,344	-1,144
R	R	C	C	639	-392	-2,150	-1,119
R	R	C	R	658	-366	-2,133	-1,144
R	R	R	C	658	-366	-2,344	-1,113
R	R	R	R	676	-339	-2,327	-1,138

Nota. Las celdas resaltadas con color verde muestran la mejor respuesta según los conjuntos de acciones siendo analizados, y las celdas en color naranja muestran la elección óptima. Las celdas en color rojo muestran la acción de contaminar.

Como se puede observar en la Tabla 5, para la primera ronda del juego en 2030 la Unión Europea (UE27) y la coalición (C4) presentan utilidades negativas en todas sus posibles estrategias. En el caso de la UE27, esto se debe a que su economía ya se encuentra comprometida con seguir un camino hacia la descarbonización, lo que limita los beneficios de emitir megatoneladas adicionales de carbono, dándole más peso a los costos del cambio climático. En el caso de C4, al ser economías más pequeñas son particularmente vulnerables a los impactos climáticos, haciendo que naturalmente los costos superen a los beneficios.

Por otro lado, aunque un análisis de desviaciones simples podría indicar que para Estados Unidos (USA) contaminar es la mejor opción en términos absolutos, es importante notar que, una utilidad negativa asociada a reducir emisiones no implica necesariamente que sea una mala estrategia. Este resultado surge porque, al optar por la reducción, los beneficios derivados de las emisiones de CO₂ comienzan a disminuir progresivamente. USA se encuentra entonces en un punto de inflexión, donde el nivel de descarbonización alcanzado para 2030 elimina por completo los incentivos a contaminar; sin embargo, se enfrenta al dilema de alcanzar este punto óptimo para este año, o

retrasar este proceso de descarbonización, ya que en esta ronda puede seguir eligiendo contaminar y mantener beneficios lo suficientemente altos para mantener una utilidad positiva.

En cuanto a las estrategias presentadas, la mejor respuesta para China y Estados Unidos sigue siendo contaminar (C) en términos absolutos, mientras que para UE27 y C4 es reducir (R). Por lo tanto, el equilibrio de Nash para 2030 es (C, C, R, R), donde China y USA contaminan y UE27 y C4 reducen. Aun así, el conjunto de acciones que representa la decisión óptima es (C, R, R, R), donde solo China contamina.

Tabla 6: Resultados del juego para $t = 2040$

CHINA	USA	EU27	C4	U^E China	U^E USA	U^E EU27	U^E C4
C	C	C	C	499	-2,600	-4,478	-2,321
C	C	C	R	575	-2,514	-4,425	-2,388
C	C	R	C	575	-2,514	-4,720	-2,371
C	C	R	R	652	-2,429	-4,668	-2,364
C	R	C	C	575	-4,168	-4,425	-2,371
C	R	C	R	652	-4,082	-4,373	-2,364
C	R	R	C	652	-4,082	-4,668	-2,346
C	R	R	R	729	-3,996	-4,615	-2,339
R	C	C	C	-532	-2,514	-4,425	-2,371
R	C	C	R	-456	-2,429	-4,373	-2,364
R	C	R	C	-456	-2,429	-4,668	-2,346
R	C	R	R	-379	-2,343	-4,615	-2,339
R	R	C	C	-456	-4,082	-4,373	-2,346
R	R	C	R	-379	-3,996	-4,321	-2,339
R	R	R	C	-379	-3,996	-4,615	-2,321
R	R	R	R	-302	-3,911	-4,563	-2,314

Nota. Las celdas resaltadas con color verde muestran la mejor respuesta según los conjuntos de acciones siendo analizados, y las celdas en color naranja muestran la elección óptima. Las celdas en color rojo muestran la acción de contaminar.

En la Tabla 6 se presentan los resultados del juego para 2040, donde se puede ver un deterioro generalizado en las utilidades de todos los jugadores respecto a 2030. La Unión Europea (UE27) y la Coalición 4 (C4) continúan mostrando utilidades negativas en todos los escenarios. En el caso de Estados Unidos (USA), la utilidad se vuelve negativa incluso cuando decide contaminar, mostrando que los costos económicos de la inacción han superado los beneficios de mantener una economía intensiva en carbono.

Por otro lado, China es el único jugador que mantiene utilidades positivas bajo ciertos escenarios, especialmente cuando los demás jugadores eligen reducir mientras China contamina (C, R, R, R), aprovechando el fenómeno del *free-riding*. Aun así, los beneficios que obtiene son considerablemente menores que en la ronda anterior, indicando que el cambio climático empieza a afectar de manera creciente. También, se puede notar que

China se enfrenta al mismo dilema que USA en la ronda 2030, pues bajo la acción de reducir se enfrenta a utilidades negativas.

El equilibrio de Nash para 2040 es (C, R, R, R), donde China decide contaminar y USA, UE27 y C4 reducir, aun así, el conjunto de acciones óptimo es (R, R, R, R) donde todos los países reducen. Aunque el equilibrio de Nash refleja incentivos individuales que llevan a la contaminación, los resultados muestran que la presión económica para transitar hacia estrategias cooperativas será cada vez mayor en las rondas futuras, a medida que los costos climáticos acumulados continúan creciendo.

Tabla 7. Resultados del juego para $t = 2050$

CHINA	USA	EU27	C4	U^E China	U^E USA	U^E EU27	U^E C4
C	C	C	C	-1,973	-7,043	-7,467	-4,643
C	C	C	R	-1,779	-6,872	-7,369	-4,806
C	C	R	C	-1,779	-6,872	-7,652	-4,768
C	C	R	R	-1,586	-6,701	-7,555	-4,744
C	R	C	C	-1,779	-9,472	-7,369	-4,768
C	R	C	R	-1,586	-9,300	-7,272	-4,744
C	R	R	C	-1,586	-9,300	-7,555	-4,705
C	R	R	R	-1,393	-9,129	-7,457	-4,681
R	C	C	C	-4,135	-6,872	-7,369	-4,768
R	C	C	R	-3,941	-6,701	-7,272	-4,744
R	C	R	C	-3,941	-6,701	-7,555	-4,705
R	C	R	R	-3,748	-6,529	-7,457	-4,681
R	R	C	C	-3,941	-9,300	-7,272	-4,705
R	R	C	R	-3,748	-9,129	-7,174	-4,681
R	R	R	C	-3,748	-9,129	-7,457	-4,643
R	R	R	R	-3,555	-8,958	-7,359	-4,619

Nota. Las celdas resaltadas con color verde muestran la mejor respuesta según los conjuntos de acciones siendo analizados, y las celdas en color naranja muestran la elección óptima. Las celdas en color rojo muestran la acción de contaminar.

Por último, la Tabla 7 muestra los resultados proyectados para el año 2050, donde todos los jugadores presentan utilidades negativas. El avance del cambio climático encapsulado en el aumento de la temperatura ha llevado a un escenario en el que ningún jugador mantiene utilidades positivas. El equilibrio de Nash para 2050 es (R, R, R, R), es decir, todos los jugadores optan por reducir emisiones.

Los resultados de las rondas proyectadas muestran que, aunque en 2030 algunos jugadores como China y Estados Unidos aún podían mantener utilidades positivas contaminando, para 2040 y especialmente en 2050, todos enfrentan pérdidas económicas debido al avance del cambio climático. Esta evolución muestra que los beneficios individuales de seguir contaminando son insostenibles en el tiempo y que la cooperación se vuelve una necesidad.

9. DISCUSIÓN

Este trabajo avanza en la literatura sobre teoría de juegos aplicada a negociaciones internacionales sobre asuntos de cambio climático y acción por el clima, al desarrollar un modelo dinámico que integra tanto las asimetrías entre países (como las documentadas por Dell et al. (2012) y Glennerster & Jayachandran (2023)), como datos empíricos clave (PIB, emisiones y costo social del carbono), respondiendo así al llamado de Madani (2013) por enfoques más anclados a la realidad. A diferencia de modelos estáticos como el Dilema del Prisionero, criticado por DeCanio y Fremstad (2013) por su simplificación, el juego repetido propuesto captura mejor la naturaleza prolongada de las interacciones climáticas, permitiendo observar cómo estrategias inicialmente no cooperativas, como China priorizando crecimiento inmediato, pueden evolucionar hacia la cooperación cuando los costos de la inacción superan los beneficios individuales y de corto plazo. Esta transición, refuerza la necesidad de marcos analíticos dinámicos como el presentado, capaces de modelar no solo equilibrios puntuales, sino trayectorias temporales completas de descarbonización, para que los agentes puedan proyectarse hacia un horizonte temporal.

Aun así, el modelo tiene limitaciones. No incorpora explícitamente los costos de la transición a una economía descarbonizada, como inversión en infraestructura, reconversión industrial o capacitación, ni la incertidumbre tecnológica que podría alterar estos costos, como advierte Mehrotra (2025). Tampoco considera factores políticos internos ni mecanismos institucionales concretos como impuestos al carbono y mercados de emisiones, que estudios como los de Nordhaus (2015) identifican como clave para fomentar la cooperación.

Estas limitaciones no invalidan los hallazgos, pero sí abren caminos para futuras investigaciones. Por ejemplo, al enriquecer el modelo mediante la incorporación de funciones de costos diferenciadas por país, que capturen las particularidades de cada economía en su camino a la descarbonización. Esto podría complementarse con la inclusión de avances tecnológicos disruptivos como la reducción abrupta en costos de energías renovables. Así, el modelo se acercaría más a la realidad al integrar actores no estatales, cuyo rol en la gobernanza climática es crucial.

Otra dirección importante sería desarrollar análisis de sensibilidad más robustos, explorando cómo variaciones en parámetros críticos, como el costo social del carbono (SCC), las proyecciones de aumento de temperatura, o la intensidad carbono de las economías, podrían afectar los equilibrios. Esto permitiría identificar puntos de inflexión clave donde pequeños cambios en las variables podrían acelerar significativamente el equilibrio de Nash que implica la cooperación internacional.

Finalmente, se podría investigar el uso de modelos de este tipo para el análisis de política aplicada, capaz de evaluar el impacto de medidas específicas, como impuestos al carbono o subsidios a tecnologías, alimentando el modelo con datos sectoriales detallados y escenarios de implementación más realistas.

10. CONCLUSIONES

El dilema de la inacción climática no responde únicamente a la falta de voluntad, sino a una estructura de incentivos económicos que aún favorece decisiones individuales y de corto plazo. El modelo desarrollado en este trabajo demuestra que, en el corto plazo, contaminar sigue siendo la estrategia dominante para varios países, ya que los beneficios inmediatos de emitir CO₂ superan los costos compartidos del cambio climático.

La dinámica del juego muestra que, aunque inicialmente la cooperación no es total, el aumento progresivo de los costos del cambio climático redefine los incentivos. Según el modelo, para 2050, incluso los países más reacios a reducir emisiones, como China y Estados Unidos, se ven obligados a cooperar, ya que las pérdidas económicas asociadas al calentamiento global superan cualquier beneficio de mantener una economía intensiva en carbono. Este hallazgo refuerza la idea de que postergar la acción climática no solo es riesgoso, sino también costoso, ya que cuanto más se retrasa la mitigación, más abrupta será la transición necesaria. El ejercicio revela a través de las utilidades negativas asociadas a reducir emisiones, que a medida que los países progresan en el camino hacia la descarbonización, los beneficios marginales de contaminar disminuyen, mientras que los costos de la inacción climática se vuelven insostenibles.

No obstante, el equilibrio de Nash encontrado en las primeras rondas del juego (2030) es subóptimo, ya que muestra a través de las utilidades, cómo los países se ven más incentivados a contaminar cuando los demás lo hacen. Esto subraya la necesidad de mecanismos internacionales que modifiquen los incentivos individuales, ya sea mediante acuerdos vinculantes, mecanismos de verificación robustos, sanciones a los *free-riders*, o sistemas de recompensas para quienes lideren la descarbonización. Las asimetrías entre los jugadores, como la dependencia del carbono de China, el poder económico de Estados Unidos, el compromiso climático de la Unión Europea y la vulnerabilidad estructural de la Coalición 4, complican aún más la cooperación, ya que cada bloque enfrenta incentivos y restricciones distintos. Esto exige políticas diferenciadas que reconozcan las desigualdades en las responsabilidades históricas y capacidades económicas.

La teoría de juegos aplicada en este trabajo no solo expone la complejidad de las negociaciones climáticas, sino que también ofrece un marco cuantitativo para evaluar escenarios futuros. Al incorporar datos empíricos, el modelo utiliza la teoría para crear una herramienta útil que permite explorar trayectorias realistas, a través del análisis del largo plazo y la proyección de consecuencias. Los resultados muestran que la inacción surge al priorizar los incentivos que generan ganancias inmediatas sobre beneficios globales a largo plazo, ya que estos pueden ser fácilmente ignorados.

Este estudio demuestra que, aunque la cooperación internacional es esencial para enfrentar el cambio climático, no emergerá espontáneamente sin intervenciones que alineen los intereses nacionales con los objetivos climáticos globales. La transición hacia una economía descarbonizada implica costos iniciales, pero el modelo muestra que, a largo plazo, la acción climática no solo es inevitable, sino también la opción más racional desde una perspectiva económica y estratégica.

11. USO DE IA

Con el fin de hacer un ejercicio académico transparente, y reconociendo las herramientas a disposición de los estudiantes para facilitar el proceso de escritura, se declara que en el presente trabajo se utilizaron herramientas de Inteligencia Artificial como ChatGPT (<https://chatgpt.com/>), DeepSeek (<https://chat.deepseek.com/>), y ChatPDF (<https://www.chatpdf.com/>) para: Revisas y mejorar la redacción del escrito, sintetizar información, y asistencia para el entendimiento de información.

Así mismo, se declara que las herramientas listadas anteriormente no fueron utilizadas para: Procesos de ideación, desarrollo de la metodología (juego), estructuración del trabajo.

12. REFERENCIAS

- Banco Mundial. (2025). *Current classification by income*. World Bank Country and Lending Groups. <https://datahelpdesk.worldbank.org/knowledgebase/articles/906519-world-bank-country-and-lending-groups>
- Bilal, A., & Känzig, D. R. (2024). The Macroeconomic Impact of Climate Change: Global vs. Local Temperature. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4826056>
- DeCanio, S. J., & Fremstad, A. (2013). Game theory and climate diplomacy. *Ecological Economics*, 85, 177–187. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2011.04.016>
- Dell, M., Jones, B. F., & Olken, B. A. (2012). *Temperature Shocks and Economic Growth: Evidence from the Last Half Century*. 4(3), 66–95. <http://dx.doi.org/10.1257/mac.4.3.66>
- Enerdata. (2024). *CO2 intensity*. World Energy & Climate Statistics – Yearbook 2024. <https://yearbook.enerdata.net/co2/world-CO2-intensity.html>
- Fondo Monetario Internacional. (2025a). *GDP, current prices*. IMF Datamapper. <https://www.imf.org/external/datamapper/NGDPD@WEO/BRA/COL/ECU/IDN/PER/PHL/THA/USA/CHN/EU/VNM>
- Fondo Monetario Internacional. (2025b). *Global Growth: Divergent and Uncertain*. In *World Economic Outlook Update*. <https://www.imf.org/en/Publications/WEO/Issues/2025/01/17/world-economic-outlook-update-january-2025>
- Glennerster, R., & Jayachandran, S. (2023). *Think Globally, Act Globally: Opportunities to Mitigate Greenhouse Gas Emissions in Low- and Middle-Income Countries*. 37(3), 111–136. <https://doi.org/10.1257/jep.37.3.111>

- Green Climate Fund. (2024). *About GCF*. Green Climate Fund. <https://www.greenclimate.fund/about>
- Hsu, S.-L. (2012). A Game-Theoretic Model of International Climate Change Negotiations. *SSRN Electronic Journal*, 14–86. <https://doi.org/10.2139/ssrn.1573054>
- Kopec, M. (2017). Game theory and the self-fulfilling climate tragedy. *Environmental Values*, 26(2), 203–221. <https://doi.org/10.1038/sj.bdj.2015.813>
- Leyton-Brown, K., & Shoham, Y. (2008). *Essentials of Game Theory* (1st ed.). Springer Cham. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-031-01545-8>
- Lucon, O., Romeiro, V., & Pacca, S. (2013). Reflections on the international climate change negotiations: A synthesis of a working group on carbon emission policy and regulation in Brazil. *Energy Policy*, 59, 938–941. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.04.058>
- M, C., D, G., F, P., M, B., M, M., E, S., F, M.-F., WE, B., R, Q., A, R. M., P, T.-M., J, K., G, G., S, R., J, M., D, O., A, B., J, S.-M., G, M., ... F, P. (2024). *GHG emissions of all world countries* (Issue KJ-01-24-010-EN-N (online), KJ-01-24-010-EN-C (print)). Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/4002897> (online), 10.2760/0115360 (print)
- Madani, K. (2013). Modeling international climate change negotiations more responsibly: Can highly simplified game theory models provide reliable policy insights? *Ecological Economics*, 90, 68–76. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2013.02.011>
- Mehrotra, N. R. (2025). *The Macroeconomics of Net Zero* [Manuscript no publicado]. Federal Reserve Bank of Minneapolis.
- Nordhaus, W. D. (1992). An optimal transition path for controlling greenhouse gases. *Science*, 258(5086), 1315–1319. <https://doi.org/10.1126/science.258.5086.1315>
- Preethi, B., Manigandan, J., & Suresh, M. V. (2019). Game Theory and Climate Change. *Game Theory and Climate Change*, 3(June), 170–175. <https://doi.org/10.7312/chan18464>
- Rohde, R. A., & Hausfather, Z. (2025). *The Berkeley Earth Land/Ocean Temperature Record*. Earth System Science Data. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/essd-12-3469-2020>
- Seo, S. N. (2017). Beyond the Paris Agreement: Climate change policy negotiations and future directions. *Regional Science Policy & Practice*, 9(2), 121–141. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/rsp3.12090>
- U.S. Bureau of Labor Statistics. (2025). *CPI Inflation Calculator*. Data Tools. https://www.bls.gov/data/inflation_calculator.htm
- UNFCCC. (2024a). *About the secretariat*. United Nations Climate Change. <https://unfccc.int/about-us/about-the-secretariat>
- UNFCCC. (2024b). *Conference of the Parties (COP)*. United Nations Climate Change.

<https://unfccc.int/process/bodies/supreme-bodies/conference-of-the-parties-cop>

UNFCCC. (2024c). *The convention*. United Nations Climate Change. <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/que-es-la-convencion-marco-de-las-naciones-unidas-sobre-el-cambio-climatico>

United States Environmental Protection Agency. (2024). *Workbook for Applying SC-GHG Estimates v1.0.2*. EPA's "Report on the Social Cost of Greenhouse Gases: Estimates Incorporating Recent Scientific Advances." <https://www.epa.gov/environmental-economics/scghg>

University of Cambridge. (2024). *What is COP?* Cambridge Institute for Sustainability Leadership. <https://www.cisl.cam.ac.uk/cop-climate-change-conference>

Wood, P. J. (2011). Climate change and game theory. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1219(1), 153–170. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2010.05891.x>

13. ANEXOS

Tabla A1. Términos de la función de utilidad para China				
Año	2023	2030	2040	2050
e_i (Reducir)	13,260	12,359	11,177	10,108
e_i (Contaminar)	13,260	15,231	18,567	22,633
PIB_t	17,758	25,696	39,905	61,972
δ_t	0.43	0.48	0.55	0.64
T_t (Reducir)	1.23	1.62	2.14	2.66
$T1_t$	1.23	1.63	2.16	2.69
$T2_t$	1.23	1.64	2.18	2.72
$T3_t$	1.23	1.64	2.19	2.74
$T4_t$	1.23	1.65	2.21	2.77
$\lambda_{i,t}$ (Reducir)	0.50	0.46	0.42	0.38
$\lambda_{i,t}$ (Contaminar)	0.50			
$\alpha_{i,t}$ (Reducir)	0.70	0.65	0.59	0.53
α_i (Contaminar)	0.70			
$E_{i,t}$ (Reducir)	11,739	12,868	11,817	10,687
$E_{i,t}$ (Contaminar)	-	14,082	16,678	20,330
β	0.12			
$B(e_t)$ (Reducir)	9,583	11,559	16,130	22,725
$B(e_t)$ (Contaminar)	9,583	13,452	21,316	33,104
SCC (Reducir)	5,683	5,878	6,170	6,476
SCC (Contaminar)	5,683	7,245	10,249	14,499
$PIB(T_t)$ (Reducir)	2,619	5,005	10,262	19,804
$PIB(T1_t)$	2,619	5,023	10,339	19,997
$PIB(T2_t)$	2,619	5,042	10,415	20,190
$PIB(T3_t)$	2,619	5,060	10,492	20,384
$PIB(T4_t)$	2,619	5,079	10,569	20,577
U^E (Reducir)	1,281	676	-302	-3,555
U^E1 (Reducir)	1,281	658	-379	-3,748
U^E2 (Reducir)	1,281	639	-456	-3,941
U^E3 (Reducir)	1,281	621	-532	-4,135
U^E (Contaminar)	1,281	1,184	729	-1,393
U^E2 (Contaminar)	1,281	1,165	652	-1,586
U^E3 (Contaminar)	1,281	1,147	575	-1,779
U^E4 (Contaminar)	1,281	1,128	499	-1,973

Nota. 2023 es el año base para los cálculos

Tabla A2. Términos de la función de utilidad para USA				
Año	2023	2030	2040	2050
e_i (Reducir)	4,682	4,364	3,947	3,569
e_i (Contaminar)	4,682	5,020	5,545	6,125
PIB_t	27,721	36,203	44,565	54,860
δ_t	0.43	0.48	0.55	0.64
T_t (Reducir)	1.23	1.62	2.14	2.66
$T1_t$	1.23	1.63	2.16	2.69
$T2_t$	1.23	1.64	2.18	2.72
$T3_t$	1.23	1.64	2.19	2.74
$T4_t$	1.23	1.65	2.21	2.77
$\lambda_{i,t}$ (Reducir)	0.27	0.25	0.22	0.20
$\lambda_{i,t}$ (Contaminar)	0.27			
$\alpha_{i,t}$ (Reducir)	0.60	0.56	0.51	0.46
α_i (Contaminar)	0.60			
$E_{i,t}$ (Reducir)	4,914	4,544	4,173	3,774
$E_{i,t}$ (Contaminar)	-	4,825	5,252	5,801
β	0.12			
$B(e_t)$ (Reducir)	7,172	8,787	9,728	10,860
$B(e_t)$ (Contaminar)	7,172	9,875	12,264	15,097
SCC (Reducir)	2,007	2,076	2,179	2,287
SCC (Contaminar)	2,007	2,388	3,061	3,924
$PIB(T_t)$ (Reducir)	4,088	7,051	11,460	17,531
$PIB(T1_t)$	4,088	7,077	11,546	17,702
$PIB(T2_t)$	4,088	7,103	11,632	17,873
$PIB(T3_t)$	4,088	7,129	11,717	18,044
$PIB(T4_t)$	4,088	7,155	11,803	18,216
U^E (Reducir)	1,078	-339	-3,911	-8,958
U^{E1} (Reducir)	1,078	-366	-3,996	-9,129
U^{E2} (Reducir)	1,078	-392	-4,082	-9,300
U^{E3} (Reducir)	1,078	-418	-4,168	-9,472
U^E (Contaminar)	1,078	410	-2,343	-6,529
U^{E2} (Contaminar)	1,078	384	-2,429	-6,701
U^{E3} (Contaminar)	1,078	358	-2,514	-6,872
U^{E4} (Contaminar)	1,078	332	-2,600	-7,043

Nota. 2023 es el año base para los cálculos

Tabla A3. Términos de la función de utilidad para EU27				
Año	2023	2030	2040	2050
e_i (Reducir)	2,512	2,181	1,782	1,456
e_i (Contaminar)	2,512	2,693	2,975	3,286
PIB_t	18,579	23,701	27,236	31,298
δ_t	0.43	0.48	0.55	0.64
T_t (Reducir)	1.23	1.62	2.14	2.66
$T1_t$	1.23	1.63	2.16	2.69
$T2_t$	1.23	1.64	2.18	2.72
$T3_t$	1.23	1.64	2.19	2.74
$T4_t$	1.23	1.65	2.21	2.77
$\lambda_{i,t}$ (Reducir)	0.16	0.15	0.13	0.12
$\lambda_{i,t}$ (Contaminar)	0.16			
$\alpha_{i,t}$ (Reducir)	0.50	0.47	0.42	0.38
α_i (Contaminar)	0.50			
$E_{i,t}$ (Reducir)	2,903	2,366	1,995	1,630
$E_{i,t}$ (Contaminar)	-	2,589	2,818	3,113
β	0.12			
$B(e_t)$ (Reducir)	2,704	3,327	3,425	3,575
$B(e_t)$ (Contaminar)	2,704	3,782	4,378	5,031
SCC (Reducir)	1,077	1,037	984	933
SCC (Contaminar)	1,077	1,281	1,642	2,105
$PIB(T_t)$ (Reducir)	2,740	4,616	7,004	10,002
$PIB(T1_t)$	2,740	4,633	7,056	10,099
$PIB(T2_t)$	2,740	4,650	7,109	10,197
$PIB(T3_t)$	2,740	4,667	7,161	10,295
$PIB(T4_t)$	2,740	4,684	7,213	10,392
U^E (Reducir)	-1,113	-2,327	-4,563	-7,359
U^{E1} (Reducir)	-1,113	-2,344	-4,615	-7,457
U^{E2} (Reducir)	-1,113	-2,361	-4,668	-7,555
U^{E3} (Reducir)	-1,113	-2,378	-4,720	-7,652
U^E (Contaminar)	-1,113	-2,133	-4,321	-7,174
U^{E2} (Contaminar)	-1,113	-2,150	-4,373	-7,272
U^{E3} (Contaminar)	-1,113	-2,167	-4,425	-7,369
U^{E4} (Contaminar)	-1,113	-2,184	-4,478	-7,467

Nota. 2023 es el año base para los cálculos

Tabla A4. Términos de la función de utilidad para C4				
Año	2023	2030	2040	2050
e_i (Reducir)	2,167	2,020	1,827	1,652
e_i (Contaminar)	2,167	2,489	3,034	3,699
PIB_t	5,680	8,278	12,856	19,965
δ_t	0.43	0.48	0.55	0.64
T_t (Reducir)	1.23	1.62	2.14	2.66
$T1_t$	1.23	1.63	2.16	2.69
$T2_t$	1.23	1.64	2.18	2.72
$T3_t$	1.23	1.64	2.19	2.74
$T4_t$	1.23	1.65	2.21	2.77
$\lambda_{i,t}$ (Reducir)	0.19	0.18	0.16	0.15
$\lambda_{i,t}$ (Contaminar)	0.19			
$\alpha_{i,t}$ (Reducir)	0.80	0.75	0.67	0.61
α_i (Contaminar)	0.80			
$E_{i,t}$ (Reducir)	1,951	2,103	1,931	1,747
$E_{i,t}$ (Contaminar)	-	2,301	2,726	3,323
β	0.12			
$B(e_t)$ (Reducir)	1,184	1,435	2,000	2,819
$B(e_t)$ (Contaminar)	1,184	1,689	2,684	4,169
SCC (Reducir)	929	961	1,008	1,058
SCC (Contaminar)	929	1,184	1,675	2,370
$PIB(T_t)$ (Reducir)	838	1,612	3,306	6,380
$PIB(T1_t)$	838	1,618	3,331	6,442
$PIB(T2_t)$	838	1,624	3,355	6,505
$PIB(T3_t)$	838	1,630	3,380	6,567
$PIB(T4_t)$	838	1,636	3,405	6,629
U^E (Reducir)	-583	-1,138	-2,314	-4,619
U^{E1} (Reducir)	-583	-1,144	-2,339	-4,681
U^{E2} (Reducir)	-583	-1,150	-2,364	-4,744
U^{E3} (Reducir)	-583	-1,156	-2,388	-4,806
U^E (Contaminar)	-583	-1,113	-2,321	-4,643
U^{E2} (Contaminar)	-583	-1,119	-2,346	-4,705
U^{E3} (Contaminar)	-583	-1,125	-2,371	-4,768
U^{E4} (Contaminar)	-583	-1,131	-2,395	-4,830

Nota. 2023 es el año base para los cálculos