

Estimación del precio social del carbono para la evaluación de la inversión pública en países de América Latina y el Caribe

**Informe Final: Cálculo del Precio Social del Carbono
para el Perú**

2024

Preparado para:



Preparado por:

Andrés Pica-Téllez
Rodrigo Dittborn
Francisca Cid
Erik Frenette



Índice

Resumen Ejecutivo	3
Introducción	11
Objetivos	13
Alternativas metodológicas para definir un Precio Social del Carbono a nivel Nacional	
14	
Precio Social del Carbono	14
Calcular el Costo Social del Carbono	17
Costo de mitigación para alcanzar objetivo de Política Pública	23
Definición política basada en evidencia	28
Experiencias de otros países:	29
Según estudios y literatura	30
Según organismos multilaterales	32
Según Mercados de Carbono	32
Benchmark para un Precio Social del Carbono	33
Síntesis de ventajas y desventajas de cada método	35
Requerimientos de información por alternativas	37
Costo Social del Carbono	37
Costo de Mitigación para alcanzar un Objetivo de Política Pública	38
Objetivo de Política Pública (e.g. NDC)	38
Antecedentes de Mitigación (e.g. estudios nacionales de mitigación)	38
Definición política basada en evidencia	39
Disponibilidad de información nacional para cálculo del PSC	40
Meta de mitigación	40
Información histórica	42
Información respecto a la proyección de emisiones	42
Medidas de mitigación	44
Tasa social de descuento	46
Experiencia previa en la fijación de un PSC	46
Evaluación de alternativas para el cálculo del PSC nacional	49
Evaluación de antecedentes para el método de “Costo de Mitigación para lograr un Objetivo de Política Pública”	50
Cálculo del Precio Social del Carbono	54
Herramienta de cálculo	54
Detalles de cálculo de los modelos	55

Dynamic Integrated model of Climate and the Economy (DICE)	55
Policy Analysis Greenhouse Effect (PAGE)	56
Cálculo y aplicación de la TSD	57
Resultados	58
Proyección de PSC futuros	59
Análisis de sensibilidad de la Tasa Social de Descuento	59
Costo Social del Carbono actual versus experiencia previa del Perú	64
Recomendaciones	69
Recomendación para aplicar el PSC a nivel nacional	71
Anexo I Mimi Framework	82
Anexo II Salidas de modelos CSC	85
Anexo III Comparación PSC países con Benchmark	89

Resumen Ejecutivo

La CEPAL, en el marco del Programa EUROCLIMA+, ha estado impulsando la iniciativa regional Precio Social del Carbono en países de América Latina. CEPAL está apoyando a los países de la región en la estimación del Precio Social del Carbono (PSC), con la idea de implementarlo en la evaluación de la inversión pública que hacen los Sistemas Nacionales de la Inversión Pública (SNIPs). Este informe presenta los insumos actualmente disponibles en el Perú para su cálculo y los resultados del mismo, lo que permitirá mejorar la toma de decisiones en materia de inversión pública.

En este contexto, se presentan los métodos disponibles para el cálculo del PSC, así como los requerimientos de información para utilizar cada uno de estos. Posteriormente, se hizo una revisión de la información disponible en el Perú, la que fue evaluada en términos de su completitud y pertinencia para aplicar dichos métodos. A partir de esta información se realizó un ejercicio de cálculo a través del método Costo Social del Carbono. En última instancia, la siguiente sección resalta las recomendaciones finales.

La primera sección recapitula las principales características y opciones de cálculo encontradas en literatura, las que son explicadas con mayor detalle en el Informe Metodología General (SSG, 2022). En términos generales, la estimación del PSC a nivel nacional se puede llevar a cabo a través de tres aproximaciones distintas (ver Figura RE1). La primera es a través del cálculo del daño marginal producto del cambio climático, es decir, estimando el Costo Social del Carbono (CSC); la segunda es estimar el Costo de mitigación para alcanzar un Objetivo de Política Pública, el que estima el Precio Sombra de los costos marginales de mitigación, sujeto a una restricción presupuestaria de carbono. Otro método comúnmente utilizado es adoptar un PSC en base a antecedentes de terceros, ya sea a partir de bibliografía (e.g. recomendaciones del IPCC), experiencias internacionales (e.g. CSC adoptado por otro país) y/o un precio de mercado de Permisos de Emisión (e.g. Mecanismo de Desarrollo Limpio [MDL]). Adicionalmente, y de acuerdo a la revisión de los antecedentes de otros países que han desarrollado e implementado un PSC, se realizó un análisis econométrico (descrito con mayor profundidad en (SSG, 2022), a partir del cual se generó un *benchmark* (o valor de referencia) para el PSC a nivel nacional para cualquier país en función de su PIB (PPA) per cápita.

Cada alternativa es válida y distintas naciones las han utilizado para el cálculo oficial de su PSC. Dependiendo de la información disponible para un país en específico, se podría tener hasta 3 alternativas metodológicas:

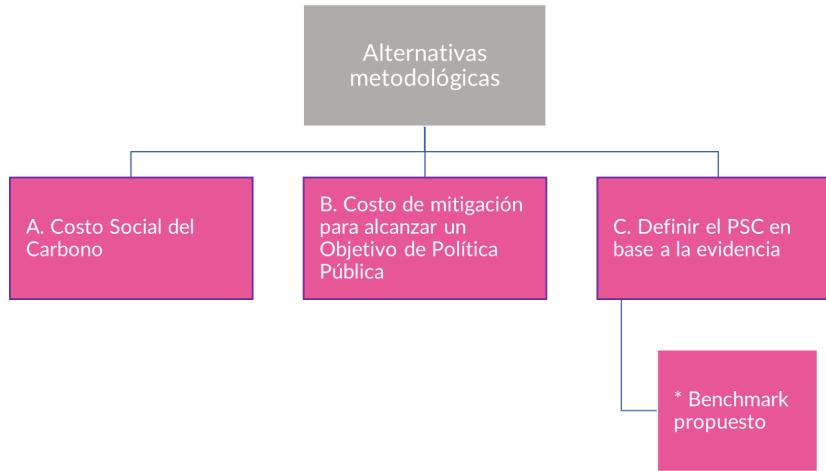


Figura RE1 Esquema de alternativas metodológicas disponibles para el cálculo del PSC.

Fuente: Elaboración propia

A. Costo Social del Carbono: Debido a que no existen modelos desarrollados para cada país, se pueden utilizar modelos desarrollados por centros de investigación internacionales, que realizan el cálculo a nivel global. Gracias a las plataformas abiertas disponibles en línea, aplicar y correr estos modelos es factible a bajos costos y requerimientos de información. Por lo tanto, el cálculo sólo requiere:

1. Seleccionar uno de los tres modelos (DICE, FUND o PAGE) o una combinación de éstos;
2. Seleccionar el escenario de emisiones a considerar o una combinación de éstos (si aplica); y
3. Definir una tasa social de descuento (e.g. TSD nacional).

B. Costo de mitigación para alcanzar un Objetivo de Política Pública: Este método es el que tiene mayores requerimientos de información, además estos antecedentes tienen que estar en un formato específico. Existen dos tipos de antecedentes, un objetivo de política pública del que sea posible derivar un presupuesto de carbono; y estudios de mitigación, como se muestra en la Tabla RE1.

C. Definición política basada en evidencia: En este caso, no se requiere de antecedentes nacionales complejos, sino más bien seleccionar el tipo de evidencia a considerar (e.g. organismos multilaterales, experiencia internacional) para luego evaluar cuál de las alternativas disponibles se ajusta mejor al contexto nacional. En caso de utilizar el *benchmark* propuesto, se debe tener disponibilidad de:

1. El PIB (PPA) per cápita nacional más actualizado disponible al momento del cálculo del PSC (e.g. 2020);

2. Trayectoria de crecimiento de PIB (PPA) per cápita en caso de querer calcular el PSC para un futuro, por ejemplo del 2022 al 2030 (opcional).

Para el caso del Perú, dado que su PIB (PPA) per cápita al 2020 fue de 11.261 USD 2017, un PSC del carbono mínimo debiera ser de 11 USD 2021/tCO₂e, un valor esperable debiera ser de 20 USD 2021/tCO₂e, y para ser considerado un país con alta ambición climática debiera tener un PSC superior a los 28 USD 2021/tCO₂e.

Tabla RE1: Principales características de los antecedentes mínimos para aplicar el método de Costo de mitigación para alcanzar un Objetivo de Política Pública.

Características del objetivo de Política Pública	Características de los antecedentes de mitigación
<ul style="list-style-type: none"> ● Objetivo principal identificable (e.g. 100 millones de toneladas de CO₂ al 2030); ● Presupuesto de carbono con un valor numérico determinado en toneladas de CO₂e (e.g. no solo % de ERNC); ● Alcance sectorial del objetivo de mitigación (e.g. todos los sectores del inventario); ● GEI a considerar en la meta (e.g. especificar GEIs). 	<ul style="list-style-type: none"> ● Proyección de emisiones para todos los sectores emisores incluidos en la meta de mitigación; <ul style="list-style-type: none"> a. Referencia/BAU; b. Máxima mitigación, que permita sobre cumplir el objetivo de mitigación. ● Caracterización de las opciones de mitigación para el escenario de máxima mitigación; <ul style="list-style-type: none"> a. Potencial de abatimiento; b. Costo Marginal de abatimiento incremental.

Fuente: Elaboración propia

La segunda sección del documento presenta los antecedentes nacionales de utilidad para el cálculo del PSC; los compromisos nacionales de reducción de GEI, la información histórica, las proyecciones de emisiones nacionales, así como de los modelos utilizados tanto para la proyección de las variables como para el análisis de carteras de medidas de mitigación; las tasas de descuento social utilizadas nacionalmente, y experiencias previas en el cálculo del PSC. Los principales antecedentes identificados fueron el “Inventario Nacional de GEI 2021” (revisado, con acceso a las base de datos), trabajos sectoriales del Grupo de Trabajo Multisectorial de naturaleza temporal 2018 (GTM-NDC) (revisado, con acceso a base de datos); estudio del BID (2021) “Costos y beneficios de la carbono-neutralidad en Perú - Apoyo a la Estrategia de Carbono neutralidad de largo plazo” (revisado, con acceso a modelos y bases de datos); y “Estimación del Precio Social del Carbono para la Evaluación Social de Proyectos en el Perú 2016” (revisado, acceso a datos solo a través del documento publicado).

La revisión de los antecedentes consistió en examinar el cumplimiento de los requisitos mínimos; la pertinencia de la información disponible para el cálculo del PSC; el acceso a las bases de datos correspondientes; y las eventuales brechas de información. Para esto, se analizaron seis elementos: meta(s) de mitigación; información histórica; proyecciones de emisiones; medidas de mitigación; tasa social de descuento; y experiencia previa en el cálculo del PSC.

Estos antecedentes se evaluaron en la sección siguiente, contrarrestando con los requerimientos mínimos de información para cada metodología de cálculo. Los resultados de esta evaluación fueron los siguientes:

- Tanto para el caso del “Costo Social del Carbono” como de la “Definición política basada en evidencia” no existe una limitación de la información disponible para utilizar esta alternativa. En otras palabras, es posible aplicar cualquiera de estos métodos casi de forma directa.
- El método del “Costo de Mitigación para alcanzar un Objetivo de Política Pública” presenta mayor requerimiento de antecedentes. Primero se detallan los Objetivos de Política Pública encontrados para el Perú (ver Tabla RE2) para luego evaluar los antecedentes nacionales (ver Tabla RE3).

Tabla RE2: Objetivos de mitigación para definir un Presupuesto de Carbono para el Perú

Possible Objetivo de Mitigación - Fuente	Periodo Presupuesto de Carbono	¿Objetivo principal?	Alcance sectorial	GEI	Presupuesto de carbono (MtCO ₂ e)
Meta nacional de mitigación de mediano plazo - NDC 2020	2030	Possible	Todos los sectores del inventario	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, HFC, PFC y SF ₆ .	Incondicional: 208,8 Condicional: 178
Meta nacional de carbono neutralidad - largo plazo - BID 2021	2050	Possible	Todos los sectores del inventario	No especifica	0

Fuente: Elaboración propia

Tabla RE3: Evaluación de antecedentes de mitigación para el Perú.

Antecedente de mitigación	Mínimos						Recomendados						
	1)	2)	3)	4)	5)	6)	7)	8)	9)	10)	11)	12)	13)
NDC (2020) e informe del Grupo de Trabajo Multisectorial (2018)	✓	✗	✗	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗
BID (2021)	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓

Fuente: Elaboración propia

- 1) Sectores y GEI considerados consistentes con el Objetivo de Política pública;
- 2) Proyección de emisiones en el escenario de referencia sin medidas de mitigación (o BAU) para todos los sectores emisores incluidos en la meta de mitigación;
- 3) Proyección de emisiones en el escenario de máxima mitigación para todos los sectores emisores incluidos en la meta de mitigación;
- 4) Potencial de mitigación de cada medida para el periodo del Presupuesto de Carbono;
- 5) Costo Marginal de abatimiento incremental para cada medida de mitigación en comparación con el escenario BAU;
- 6) PSC estimado da un valor positivo;
- 7) Realizado por una agencia de gobierno o encargada de este;
- 8) Realizado en un contexto consistente con el Objetivo de Política Pública;
- 9) Fue sometido a un proceso de validación o consulta pública;
- 10) Realizó una modelación coherente para todos los sectores de emisión (mismo parámetros de modelación y periodos de análisis para todos los sectores);
- 11) Presenta proyecciones de emisiones nacionales actualizadas, incluyendo los efectos de la pandemia;
- 12) Proyección de emisiones nacionales son consistentes e idealmente fueron calibradas con los inventarios de GEI nacionales;
- 13) Es posible acceder a los modelos o al menos a las planillas de cálculo detalladas con los resultados de modelación.

La evaluación del método Costo de mitigación para alcanzar un Objetivo de Política Pública indica que existen antecedentes suficientes para el cálculo, pero que los resultados de aplicar dicha aproximación no se condicen con la realidad nacional. La incertidumbre del método significa obtener valores extremos de más de 100 USD/tCO₂e para una de las metas de mitigación, o valores por debajo del actual PSC. Debido a esto y a la experiencia previa del Perú, se optó por el método Costo Social del Carbono.

Para el cálculo se utilizó la tasa social de descuento decreciente del Perú, que varían entre 8% a 1% dependiendo del horizonte temporal. La Tabla RE4 muestra los resultados para cada modelo, según las tasas de descuento por defecto del modelo, así como las tasas del Perú. Para entender la relevancia de la tasa social de descuento, también se hizo un análisis de sensibilidad para distintas tasas de descuento, como se muestra en la Figura RE2. Los resultados indican que la tasa de descuento es un factor importante en el cálculo, mostrando incrementos de alrededor del 15-20% del valor del CSC a medida que la tasa de descuento disminuyó en una unidad porcentual, para el caso de los escenarios 1, 2, 3 y 4.

Estas diferencias se acentuaron al trabajar con tasas aún menores, donde los valores aumentan considerablemente (a más del doble) para el mismo año (ver Figura RE3).

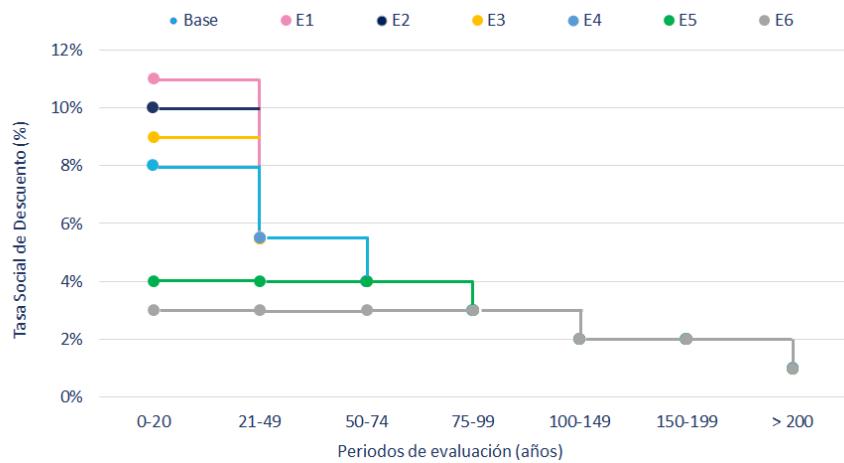


Figura RE2. Escenarios de Tasa social de descuento decreciente.

Fuente: Elaboración propia.

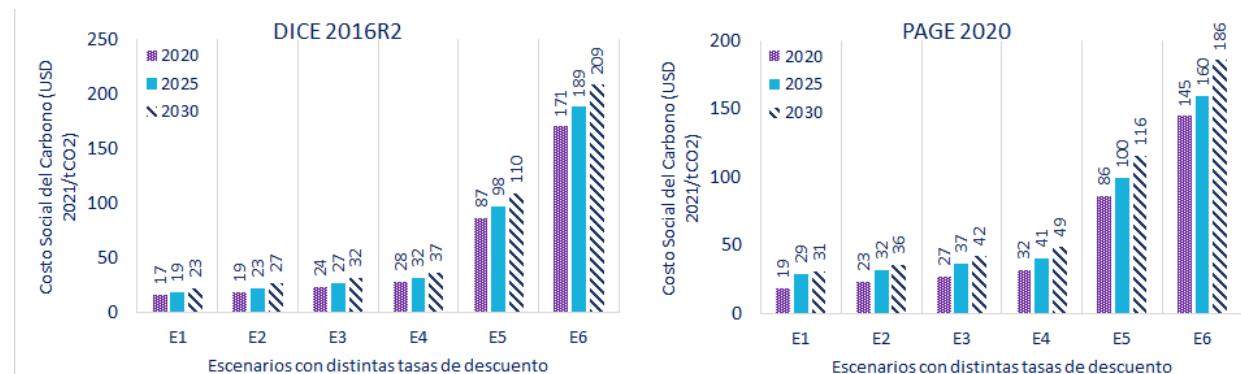


Figura RE3. Proyección futura del Costo Social del Carbono para distintas tasas de descuento decreciente.

Fuente: Elaboración propia.

La recomendación para el Perú es utilizar una tasa decreciente del 8% (equivalente al escenario E4), ya que sigue los lineamientos del sistema de evaluación de proyectos del Perú y es consistente con la realidad nacional.

Tabla RE: Costo Social del Carbono para el Perú (USD 2021/tCO₂) para el año 2020.

Modelo	CSC (USD 2021/tCO ₂) - TSD por defecto	CSC (USD 2021/tCO ₂) - TSD decreciente
DICE 2016R2	44	28
PAGE 2020	279	32
Promedio	162	30

Fuente: Elaboración propia.

Cabe destacar que estos valores son diferentes a los obtenidos en la experiencia previa de cálculo de PSC realizada el año 2016, esto debido a que se ocupan aproximaciones de cálculo diferentes, las principales diferencias son:

- El cálculo del 2016 utiliza una aproximación nacional a las emisiones, mientras que el actual realiza el cálculo a nivel global. En este contexto, se recomienda utilizar una perspectiva global ya que no es posible aislar a un país de los daños producidos por las emisiones de terceros, debido a las características de contaminante global de los GEI, por lo que no es posible vincular exclusivamente los daños nacionales a las emisiones nacionales.
- El 2016, se estiman los daños como una disminución del PIB producto de la aplicación de un impuesto a los combustibles y sus efectos sobre el consumo energético y las emisiones. Este trabajo estima los daños globales asociados a una gran variedad de factores, ya sea productivos como de no-mercado (i.e. tales como los impactos por pérdidas de servicios ecosistémicos).
- Ambos trabajos difieren en sus tasas de descuento, el año 2016 se utilizó una tasa fija del 9%, mientras que el 2022 se utiliza una decreciente del 8%-1%, consistente con los lineamientos de evaluación de proyectos de inversión pública del Perú.

A partir de estos valores, el Perú puede optar por seleccionar uno de los modelos o una combinación de estos. Se recomienda utilizar un **PSC de 30 USD2021/tCO₂** para el Perú, que corresponde al promedio de los modelos, ya que es bastante consistente con la realidad nacional - según lo estimado en el benchmark -, representando además una alta ambición climática en comparación a otros países que han avanzado en la materia.

La actualización de los precios sociales es un elemento clave dentro del proceso de los Sistemas Nacionales de Inversiones, lo que también aplica para el PSC. En este respecto, recomendamos actualizar el cálculo del PSC al menos cada 5 años. Sumado a esto, las futuras actualizaciones se realicen con los modelos más actualizados disponibles, ya que entregan una mejor representación del estado del arte en materia de cambio climático, lo que permitirá realizar una mejor estimación del PSC.

El uso del PSC es útil en la evaluación de toda inversión y política pública, sin embargo debe priorizarse para las tipologías de proyectos vinculadas a las medidas de mitigación ya identificadas a nivel nacional.

Para los proyectos de inversión pública es relevante al realizar la evaluación social del proyecto, contemplar la evaluación de la alternativa de bajas emisiones, por ejemplo al evaluar un proyecto de transporte público comparar la alternativa de buses eléctricos y no solo la alternativa tradicional.

En la evaluación de políticas públicas de alto impacto en emisiones de GEI, tales como políticas energéticas, transporte, infraestructura, agrícolas, forestales y de conservación de ecosistemas. El uso del PSC puede ser un elemento clave para identificar oportunidades de acción climática, además de poder clasificar con claridad las que podrían requerir de incentivos para su implementación.

Para políticas públicas vinculadas al sector energético, resulta de utilidad utilizar el PSC en los modelos de planificación eléctrica, dado que permitirá identificar la solución de menor costo social en el largo plazo, lo que permitirá identificar los nuevos proyectos energéticos a priorizar, las centrales que es recomendable desconectar, entre otros aspectos.

En general, una vez definido el PSC a nivel nacional, el mayor desafío en su adopción se encuentra en poder realizar la proyección de emisiones asociadas a las distintas alternativas de proyectos y/o políticas públicas por parte de los sectorialistas. Para abordar esta barrera es recomendable realizar estudios que identifiquen las tipologías de proyectos de inversión más relevantes a nivel nacional, para luego desarrollar metodologías y herramientas que faciliten la evaluación social por parte de los sectorialistas. CEPAL ha realizado una serie de trabajos en la materia para países de la región para proyectos de Transporte Urbano, Infraestructura de Transporte Interurbano, Energía, entre otros, los cuales pueden ser de utilidad en la ampliación de la adopción del PSC en el Perú.

Introducción

La crisis climática continúa siendo uno de los principales desafíos a nivel global. La comunidad internacional se comprometió, a través del Acuerdo de París, a trabajar por mantener el aumento de la temperatura global por debajo de los 2°C, y a hacer un esfuerzo mayor para que este aumento no supere los 1,5°C. El último reporte del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) llamó nuevamente la atención respecto a la urgencia de acelerar la acción para intentar alcanzar los objetivos del Acuerdo (IPCC, 2022). Por medio de las metas de reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) presentadas en las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDCs, por sus siglas en inglés), los países firmantes han ratificado el compromiso de trabajar por evitar un aumento de temperatura que ponga en riesgo la supervivencia humana, así como de ecosistemas y especies.

En este contexto, el Perú ratificó el Acuerdo de París el 2016 y presentó su Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC de su sigla en inglés). Este compromiso se actualizó el año 2020 para el período 2021-2030 a través de la NDC 2020. Esta última actualización plantea compromisos tanto de mitigación como de adaptación al cambio climático a nivel nacional.

En materia de mitigación, la NDC plantea dos objetivos, uno incondicional, que estipula limitar las emisiones netas nacionales a 208,8 MtCO₂e en el año 2030; y uno condicional sujeto a apoyo internacional, que incrementa la ambición a 179 MtCO₂e como límite máximo de emisiones para el mismo año. Ambas metas cubren los sectores Energía; Procesos Industriales y Uso de Productos; Residuos; Uso de la Tierra, Cambio de Uso de la Tierra y Silvicultura; y Agricultura. Así como también abarcan los gases dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorocarburos (HFC), perfluorocarburos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆).

Para el cumplimiento del Acuerdo de París, así como para estar alineado con la ciencia, Perú también plantea una meta de largo plazo al 2050, para la cual se plantea carbono neutralidad de emisiones.

Existe un conjunto de instrumentos que un país puede implementar para intentar reducir sus emisiones de GEI, donde destacan los instrumentos económicos, tales como el impuesto al carbono, Sistemas de Comercio de Emisiones y Precio Social del Carbono (PSC), entre otros. El PSC tiene la particularidad de que puede ser usado en la evaluación de la inversión pública para discriminar entre inversiones altas y bajas en carbono y, a través de ello, cambiar las rentabilidades de los proyectos en favor de las que sean más bajas en emisiones de carbono.

La CEPAL, en el marco del Programa EUROCLIMA+, ha estado impulsando la iniciativa regional Precio Social del Carbono en países de América Latina. Como parte de ello, se realizaron estudios que midieron el efecto del Precio Social del Carbono en la inversión pública en sectores clave como energía, transporte, infraestructura de caminos y modos de transporte, dando cuenta de la relevancia de incorporar el PSC para la evaluación de inversiones públicas. CEPAL está apoyando a los países de la región en la estimación del precio social del carbono, con la idea de implementarlo en la evaluación de la inversión pública que hacen los Sistemas Nacionales de la Inversión Pública (SNIPs). Este informe presenta los insumos actualmente disponibles en el Perú para su cálculo y los resultados del mismo, lo que permitirá mejorar la toma de decisiones en materia de inversión pública.

Objetivos

Acompañar a la CEPAL en la asistencia técnica a países seleccionados de América Latina y el Caribe en la temática de Precio Social del Carbono, mediante una propuesta metodológica para la estimación del precio social del carbono para aplicarla en conjunto con las autoridades pertinentes del Perú.

En particular este informe aborda los siguientes objetivos específicos:

- Presentar las alternativas metodológicas para el cálculo del Precio Social del Carbono;
- Evaluar la información disponible a nivel nacional para implementar el cálculo del PSC con cada alternativa metodológica;
- Analizar las ventajas y desventajas para la aplicación de cada alternativa metodológica;
- Calcular el PSC para el Perú de acuerdo a la metodología seleccionada a través de la evaluación.

Con el fin de cumplir estos objetivos, el presente documento se estructura de la siguiente forma. La siguiente sección entrega una breve descripción de las distintas aproximaciones metodológicas para el cálculo del PSC. Seguidamente, se realiza una descripción de los antecedentes disponibles a nivel nacional para calcular el PSC. Posteriormente, se presenta una evaluación de cada alternativa metodológica para el cálculo del PSC. La penúltima sección detalla la mecánica de cálculo del PSC y los resultados de este. Finalmente, se entregan recomendaciones.

Alternativas metodológicas para definir un Precio Social del Carbono a nivel Nacional

Esta sección presenta una descripción de lo que es el PSC, seguido de una descripción de las alternativas para el cálculo de este a nivel nacional, junto con las consideraciones a tener en cuenta asociadas a cada opción.

Precio Social del Carbono

Las emisiones de GEI producto de las actividades productivas antropogénicas son una externalidad negativa, que afecta al sistema climático global. Estas externalidades implican ineficiencias económicas, puesto que los verdaderos costos de las acciones no son internalizados por los emisores.

La razón por la que las emisiones de GEI no se reducen a la escala necesaria, aún considerando la vasta evidencia científica, puede entenderse desde la simple explicación de la estrategia de juegos, especialmente con el “Dilema del prisionero” (Foley, 2009). Un agente emisor de GEI percibe el costo marginal de emitir como cero, y aún en el caso hipotético de que sea capaz de predecir las trayectorias de emisiones globales, así como las consecuencias de estas, la mayor parte del daño que generará recaerá sobre otros y sólo una fracción despreciable sobre él. Por lo tanto, el agente no invertirá en acciones de mitigación ni disminuirá su producción. Todos los emisores tienden a elegir el mismo camino, por lo que las reducciones no ocurren. Es por esto que el cambio climático global a causa de las emisiones GEI constituye un caso de “Tragedia de los [bienes] comunes”. El clima global seguro, y por consiguiente los sumideros de GEI atmosféricos, se consideran un bien público ya que cumplen con el criterio de no rivalidad y no exclusión. Es decir, el clima seguro es un bien compartido, donde cada habitante del planeta recibe los

beneficios y estos no son menores porque el vecino disfrute de estos beneficios (no rivalidad), y no es posible excluir del clima seguro a nadie de la sociedad (no exclusión).

El tamaño del sumidero, las actividades que hacen uso de este y el gran número de agentes emisores obstaculizan la gobernanza del bien (Hardin, 1968; Paavola, 2012). Las consecuencias de esta situación son los cambios en el clima, cuyos impactos negativos (externalidades globales) son un mal común. Es decir, los impactos del cambio climático sobre un agente no impide que otros también se vean afectados, y no es posible aislar (o altamente costoso) de estos impactos a un agente en particular (Cartes Mena, 2021; Ibarrarán, 2010).

En esta situación, el caso óptimo sería la existencia de instituciones que permitan ajustar estas ineficiencias, al promover la internalización de estas externalidades por parte de los agentes emisores. Por ejemplo, por medio de una señal de precio correcta se lograría el equilibrio entre los daños producto de contaminar y los beneficios productivos, alcanzando el óptimo social de producción. En otras palabras, incentivos que gestionen y restrinjan las emisiones de GEI (o de la destrucción de sumideros). Cualquier señal de precio incentiva a invertir recursos en mitigación, y si esta es la misma para todos los agentes, se pueden reducir las externalidades de manera costo eficiente. Sin embargo, el óptimo social se alcanza cuando el costo marginal de la mitigación iguala al beneficio marginal de descontaminar (daño marginal producto del cambio climático evitado).

En la Figura 1 representa las curvas de costos marginales asociadas a distintos niveles de concentración de CO₂ (las que se condicen con una cierta cantidad de CO₂ emitida a nivel global). La curva azul representa la valoración de los daños marginales debido a los impactos del cambio climático o “daños por contaminación”, es decir, cuánto le cuesta a la sociedad emitir una tonelada (o unidad) adicional de CO₂. La curva verde, por otro lado, representa el costo marginal social de reducir las emisiones, o “costo de mitigación”. El cruce de ambas curvas muestra el punto de equilibrio, el que corresponde al Precio Social del Carbono (PSC) óptimo.

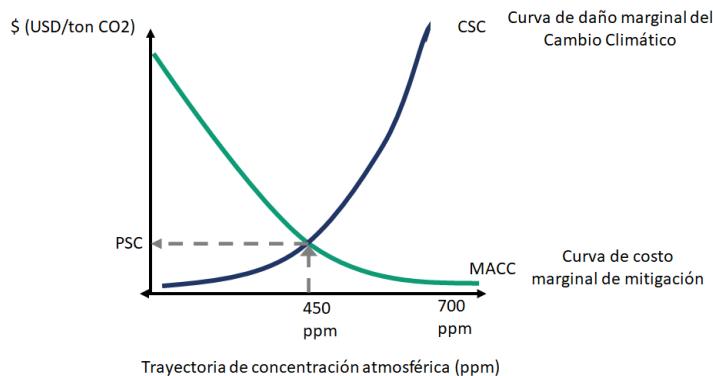


Figura 1 Determinación del Precio Social del Carbono

Fuente: Elaboración propia

La incorporación del PSC en los análisis costo-beneficio resulta útil para la evaluación de proyectos y políticas públicas, ya que permite dimensionar las consecuencias positivas y negativas de la implementación de cada alternativa de diseño. Al valorizar los posibles impactos en la evaluación de un proyecto -incluido el cambio climático- por medio del PSC, la decisión de la opción socialmente más conveniente se hace sencilla para la solución de mayor valor presente.

La estimación del PSC se puede desarrollar a través de distintas metodologías. La primera es a través del cálculo del daño marginal producto del cambio climático, es decir, estimando el Costo Social del Carbono (CSC); la segunda es estimar el Costo de Mitigación para alcanzar un Objetivo de Política Pública, el que estima el Precio Sombra de los costos marginales de mitigación, sujeto a una restricción presupuestaria de carbono. Otro método comúnmente utilizado se basa en adoptar un PSC en base a antecedentes desarrollados por terceros, ya sea de revisar bibliografía (e.g. Recomendaciones del IPCC), experiencias internacionales (e.g. CSC adoptado por otro país) y/o Precio de un Mercado de Permisos de Emisión (e.g. Mecanismo de Desarrollo Limpio [MDL]).

El método técnicamente más preciso es el cálculo del CSC marginal producido a nivel global, el que subirá año a año en la medida en que el mundo siga emitiendo GEI y agotando el presupuesto de carbono global. Por otro lado, el método del Costo de Mitigación para alcanzar un Objetivo de Política Pública, si el presupuesto de carbono se define óptimamente (punto de intersección de la Figura 1), refleja el Precio Sombra de los costos marginales de mitigación, nos permitirá llegar al mismo resultado dado que representa la solución al problema dual de optimización. Es decir, si existiese un mercado que abarcara todas las emisiones a nivel global y el mercado fuera competitivo, entonces el CSC coincidiría con el valor obtenido a partir de la aproximación del Precio Sombra de los costos de mitigación. A su vez, si se considera el caso de implementación de políticas climáticas costo-efectivas (Price et al., 2007), el PSC sería el mismo de forma transversal en todos los sectores emisores e igual al CSC. En la práctica, este no es el caso, ya que no

existe un mercado global competitivo que transmite permisos de emisiones, y los estados implementan una serie de políticas climáticas que dependen de los recursos actualmente disponibles.

A continuación se presentan las 3 categorías de metodologías para la definición de un PSC:

1. Costo Social del Carbono;
2. Costo de mitigación para alcanzar un Objetivo de Política Pública;
3. Definición política basada en evidencia.

Los detalles de cada alternativa se presentan en las siguientes sub-secciones.

Calcular el Costo Social del Carbono

En términos generales, el costo social del carbono (CSC) es una medición económica que entrega un estimado de los daños marginales netos producidos por la emisión de GEI. Al ser un valor neto, implica que considera tanto los impactos negativos como positivos. Así, la cuantificación del CSC se traduce en un valor monetario de los daños futuros causados por la emisión de una 1 tonelada de CO₂ a la atmósfera, o los beneficios de reducir 1 tonelada de CO₂ en un año determinado. Este enfoque busca reflejar lo que debería ser la disposición de la sociedad a pagar hoy por evitar los daños presentes y futuros asociados al cambio climático.

En sus inicios, el cálculo monetario se basó en distintos métodos (Tol, 2011). Por un lado, algunos estudios emplean enfoques *enumerativos*, donde los efectos físicos del cambio climático se obtienen de forma individual desde publicaciones científicas. Los efectos físicos, por lo general, se consiguen a través de modelos climáticos, de impactos o similares. Posteriormente, cada impacto se valora monetariamente y se suman. La evaluación económica depende de si se trata de bienes transables en el mercado o no. Si es el caso, se evalúan en función de los cambios en su productividad (e.g. productividad agrícola) y los precios de mercado. Si no son transables, se refieren a impactos sobre el bienestar humano, lo que se traduce en una evaluación económica de los impactos sobre la salud, por ejemplo, a través de cambios en las tasas de mortalidad producto del cambio climático.

Otros estudios, emplean métodos *estadísticos* que se basan en variaciones observadas dentro de un territorio, en cuanto a precios y gastos provenientes de los impactos en el bienestar humano. Algunos de estos estudios utilizan valores observables por sector y por región, para luego extrapolar los resultados a nivel global. Otros, en tanto, emplean valores agregados de los impactos climáticos sobre los ingresos a nivel global.

La complejidad de ambos métodos subyace en la necesidad de estimar los costos netos de los impactos, es decir, tanto los efectos negativos como positivos. Algunas aproximaciones

buscan mostrar de forma agregada los impactos en distintas regiones del mundo donde las diferencias son evidentes; por ejemplo, en el consumo y demanda de energía para enfriamiento o calefacción. Sin embargo, si bien existen beneficios principalmente en el corto plazo, se estima que los costos negativos superan por mucho los positivos en el largo plazo (Tol, 2011). Actualmente, los cálculos involucran además parámetros que permiten hacer distinciones regionales de los impactos y diferencias en ingreso per cápita (ponderaciones por equidad, o *equity weighting*). Es decir, explícita y/o implícitamente se incorpora la vulnerabilidad de los territorios a los impactos físicos y su capacidad de respuesta y adaptación, ya sea por recursos económicos o capacidades institucionales, entre otros.

Este método no requiere de un objetivo de mitigación en particular, sino que calcula, para cada año el CSC, considerando el nivel de emisiones acumulados globalmente hasta ese momento, en base al valor presente de las externalidades futuras que generaría esa tonelada de GEI de ser emitida. Para obtener el CSC a partir de la curva de daño marginal asociado al cambio climático para un año en particular, basta con conocer el nivel de emisiones/concentraciones de GEI para ese año (ver Figura 2), por ejemplo si la concentración actual es de 420 ppm de CO₂.

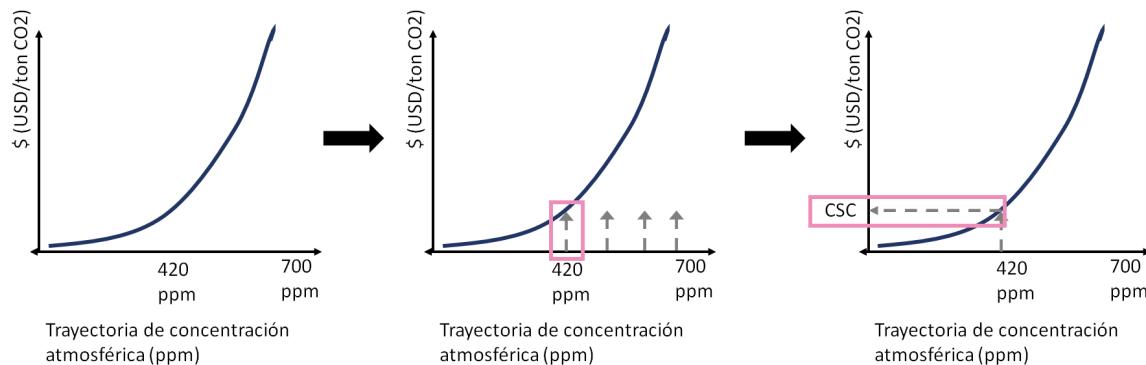


Figura 2 Ejemplo esquemático de determinación del CSC

Fuente: Elaboración propia

En términos generales, la modelación de la curva de daño marginal asociado al cambio climático y el cálculo del CSC implica cinco etapas principales (ver Figura 3): (i) estimación de las emisiones de GEI; (ii) determinar las concentraciones de los GEI en la atmósfera debido a dichas emisiones; (iii) efectos de estas emisiones sobre el sistema climático; (iv) determinar los impactos sobre los sistemas humanos y naturales debido a cambios en el sistema climático, y su valoración monetaria; (v) descuento de los flujos monetarios a valor presente. Estas etapas pueden agruparse en cuatro módulos de trabajo: (a) socioeconómico; (b) climático; (c) función de daño; (d) tasa de descuento. Es relevante mencionar que estas etapas son recursivas, ya que existe retroalimentación entre ellas a lo largo del cálculo; por ejemplo, los impactos pueden tener un efecto sobre los escenarios

socioeconómicos y a su vez sobre las emisiones GEI, resultando en mayores/menores concentraciones en la atmósfera.

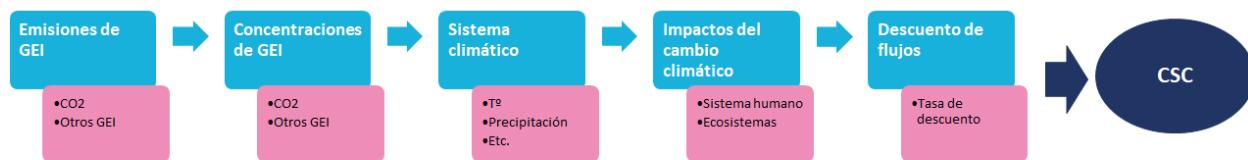


Figura 3. Marco de referencia de la estimación del costo social del carbono.

Fuente: Elaboración propia

La evaluación se realiza a través de Modelos de Evaluación Integrados (IAM, por sus siglas en inglés), entre los cuales los más conocidos son el Dynamic Integrated Climate-Economy (DICE) (Nordhaus, 2010), Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution (FUND) (Anthoff & Tol, 2013a, 2013b), y Policy Analysis of Greenhouse Effect (PAGE) (Hope, 2013). Estos han sido utilizados por el Interagency Working Group en Estados Unidos para los análisis de impacto regulatorio (National Academies of Sciences, 2017).

Los modelos IAMs definen una línea base de trayectorias de emisión al proyectar distintos escenarios futuros de crecimiento económico, población y cambio tecnológico. A esta línea base se le adiciona una tonelada de CO₂ (pulso de adición de emisiones), lo que luego se traduce en estimar las concentraciones de CO₂ en la atmósfera y su resultado en el incremento de la temperatura global del planeta y alza en el nivel mar, entre otras variables climáticas. A partir de este punto, se estiman los impactos físicos y se valoran monetariamente los daños. Sin embargo, debido a que el forzamiento radiativo de los gases emitidos perdura en el tiempo, los cambios presentes en la concentración de GEI en la atmósfera afectarán la productividad económica de las futuras generaciones. Por lo tanto, los flujos monetarios de los daños ocasionados a lo largo del tiempo son convertidos a valores presentes a través de tasas de descuento.

Como se indicaba anteriormente, la estimación del daño marginal asociado a la emisión de una tonelada adicional de CO₂e, requiere la elaboración y/o utilización de IAMs, lo que implica altos requerimientos de información y capacidades computacionales. Cuando se pretende estimar el CSC a nivel nacional, se debe tener en cuenta que no es recomendable aislar los daños a una jurisdicción, ya que impactos sobre otras regiones del planeta influencian indirectamente los impactos sobre dicha jurisdicción. Tampoco es recomendable establecer un PSC en función solo de las emisiones del país respecto al total global. Esto es debido a que los daños económicos asociados al cambio climático, no están relacionados necesariamente con el nivel de emisiones de un país en particular.

Si bien cada país podría desarrollar su propio IAM, los costos y desafíos asociados a esta tarea son significativos -además de poco justificados- dado que existe una importante tradición científica de desarrollo de IAMs globales que ya han sido revisados por la comunidad científica internacional. El principal referente para el cálculo del CSC es Estados Unidos, a partir del cual países como Canadá han decidido utilizar valores similares a los desarrollados por el primero, con pequeños ajustes. Los modelos empleados por Estados Unidos son los más comúnmente utilizados en el cálculo del CSC.

La Tabla 1 describe las principales alternativas disponibles y sus características. Cabe destacar que estas alternativas permiten obtener valores de CSC para el uso en evaluación de iniciativas públicas y de impacto regulatorio, donde se pueden ajustar ciertos parámetros de entrada, tasas de descuento, entre otras. Adicionalmente, existen opciones de complementar estas alternativas, ya sea mediante el uso de otros escenarios de mitigación, sistemas de modelación climáticos diferentes, distintas funciones de daño, etc. Aquí se presentan los tres principales modelos que entregan como resultado final el CSC, más allá de las posibles modificaciones a estos dependiendo de las necesidades de cada tomador de decisión.

Tabla 1: Características principales de las alternativas metodológicas para la estimación del CSC.

Modelo y última versión	Áreas geográficas	Gases	Sectores (impactos y daños)	Rango temporal	Adaptación	Módulo climático utilizado	Fuente de información
PAGE (Hope, 2013; Kikstra et al., 2021; Yumashev, 2020; Yumashev et al., 2019) PAGE 2020	8 regiones: Unión Europea, Rusia, China, EE.UU., India, África, Latinoamérica, otros OECD	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, gases lineales, sulfatos, otros GEI	Mercado, no-mercado, aumento en el nivel del mar y discontinuidad estocástica. Los daños son tratados en base una distribución equitativa de los impactos (<i>equity weighting</i>).	2008-2200 Opción de modelación anual	Incluye adaptación de forma endógena, ya que los impactos dependen de los años anteriores	Representación del clima según el Quinto Informe del IPCC (RCP y SSP)	Sitio en línea donde se encuentra disponible el modelo: https://doi.org/10.5281/zenodo.5256554
DICE (Nordhaus, 2017, 2018) DICE 2016 R2	Global		Componente de daño único, que depende especialmente del aumento de la t° global.	2015-2100	Implícitamente representada en sus parámetros	Representación del clima según el Quinto Informe del IPCC (RCP y SSP)	
FUND (Waldhoff et al., 2014) FUND 3.9	16 regiones: EE.UU., Canadá, Europa occidental, ex- Unión Soviética, Medio Oriente, América Central, Sudamérica, Asia del sur, Sudeste asiático, China, Norte de África, África Sub-Sahariana, y	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, SF ₆ y aerosoles	Agricultura, silvicultura, aumento en el nivel del mar, desórdenes cardiovasculares y respiratorios por estrés de t°, malaria, dengue, consumo energético, recursos hídricos, sistemas no	1950-3000, modelación anual	Incluye adaptación de forma endógena, ya que los impactos dependen de los años anteriores	Representación del clima según el Cuarto Reporte de Evaluación del IPCC	Los datos respecto a las proyecciones globales de poblaciones, PIB, escenarios, y otros, se encuentran en: http://www.fund-model.org/documentation/ Mientras que el sitio en línea que permite correr el modelo es: https://github.com/fund-model/MimiFUND.jl

Modelo y última versión	Áreas geográficas	Gases	Sectores (impactos y daños)	Rango temporal	Adaptación	Módulo climático utilizado	Fuente de información
	Pequeños Estados Insulares		manejados (e.g. ecosistemas), diarrea y tormentas tropicales y extratropicales				

Fuente: Elaboración propia

Estos tres modelos, y otros, han sido computarizados en una plataforma de uso abierto para todo usuario¹. La plataforma ha sido desarrollada por el *Resources for the Future* (RFF)² con el fin de mejorar el acceso a los modelos por parte de los tomadores de decisión. Los modelos entregan los valores finales de CSC tanto usando estimados promedio de ciertos parámetros, así como aplicando simulaciones de Montecarlo. Además, es posible ajustar los valores de entrada, ya sea definiendo distintas tasas de descuento, escenarios de mitigación, entre otros, dependiendo de los objetivos de la simulación. La plataforma permite visualizar en detalle todos los supuestos y resultados intermedios, tales como los cambios en la tº y el nivel del mar.

Entre las recomendaciones de la National Academies of Sciences (2017) también destaca Fair (Leach et al., 2021; Nicholls et al., 2020), pero a diferencia de los tres mencionados este no es un IAM en particular, sino que un modelo simplificado del clima (*Simplified-earth system model*), por lo que no permite directamente el cálculo final del CSC, sino que entrega una herramienta adicional a los IAM para mejorar su módulo climático. En particular, Fair se destaca entre los modelos debido a su simplicidad y robustez en el cálculo, además de poder ser corrido con bajos requerimientos computacionales; por ejemplo, usando Excel, y sin necesidad de supercomputadores.

Las principales críticas a estos modelos se basan en la subestimación del daño, al no incluir todos los daños posibles -tanto en el mercado como fuera de él-, al presentar debilidades en la cuantificación de eventos extremos y sus impactos, así como al evaluar los beneficios y bienestar de las generaciones futuras en relación a los sacrificios de las actuales. Otros elementos sujetos a crítica se refieren a que no han sido capaces de integrar los nuevos hallazgos científicos en relación a los daños, costos y probabilidades de impacto que se han desarrollado en los últimos años. Sumado a esto, muchas de las trayectorias ignoran la retroalimentación entre distintos módulos (e.g. riesgo de sequía con la producción agrícola), y las estimaciones se basan en una serie de suposiciones que entregan un alto grado de incertidumbre (Pindyck, 2013), presentando más bien un obstáculo para la toma de decisiones y socavando la utilidad de esta aproximación (Stern et al., 2022).

Costo de mitigación para alcanzar objetivo de Política Pública

La principal alternativa a los modelos IAM para el cálculo del PSC ha sido en base al uso al cálculo del costo de mitigación asociado a un objetivo de Política Pública. Esto en base a las curvas MAC y un presupuesto de carbono asociado al objetivo de Política Pública, cuya aproximación también es conocida como *target-consistent approach* (aproximación en base

¹ Disponible en: <https://www.mimiframework.org>

² Institución de investigación sin fines de lucro.

a un objetivo de política pública, según su traducción al español). Este simplifica los requerimientos de información en comparación al desarrollo de modelos IAM, dado que requiere de modelos de emisión y costos de mitigación que pueden ser nacionales, los que son más sencillos y dependen de menos suposiciones sobre el accionar de otros países. Además, tienen la virtud de generar una señal de precio consistente con los objetivos nacionales de mitigación (ej: NDC), promoviendo la acción climática en todas las políticas e iniciativas públicas evaluadas con este PSC.

La complejidad de la estimación del Costo Social del Carbono (CSC) a través de IAMs se ha traducido en la búsqueda de aproximaciones alternativas, como el uso Costo de mitigación para alcanzar un Objetivo de Política Pública, por la mayor simplicidad relativa de calcular una curva de costos de mitigación global, y que se puede obtener el presupuesto de carbono de referencia a partir de los objetivos del Acuerdo de París (e.g. Evitar un calentamiento mayor a 1,5°C). Es importante resaltar que ambos métodos son equivalentes en determinar el PSC óptimo exclusivamente cuando se intersectan las curvas de la Figura 1. En este punto, también se puede inducir el Presupuesto de Carbono Global óptimo (emisiones acumuladas hasta alcanzar el punto de intersección de ambas curvas). Dado que la estimación del Presupuesto de Carbono Global óptimo resulta igual de compleja que el cálculo del CSC, es común la selección de una meta de mitigación (e.g. evitar que el planeta se caliente más de 1,5°C) y sobre esta calcular el Presupuesto de Carbono asociado al cumplimiento de esta meta. Esta aproximación no refleja necesariamente el PSC óptimo socialmente, pero refleja el PSC necesario para cumplir una cierta meta de mitigación; y si esta señal de precio afecta a todos los sectores de la economía, incentivaría la implementación de medidas costo-eficientes, cumpliendo con la meta de mitigación al menor costo posible para la economía. La Figura 4 presenta un gráfico que muestra el cálculo del PSC a partir de un Objetivo de Política Pública, y su respectivo presupuesto de carbono.

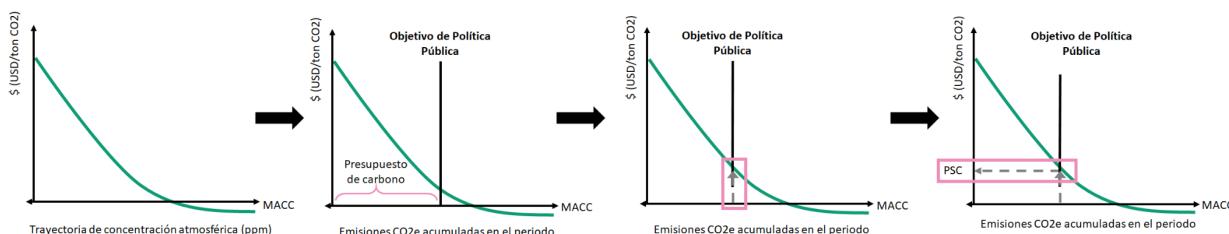


Figura 4 Determinación del PSC a partir de un objetivo de mitigación.

Fuente: Elaboración propia

La Figura 5 representa el proceso necesario para calcular el PSC asociado al cumplimiento de un objetivo de política pública. El primer desafío es identificar el objetivo nacional de mitigación. Un referente natural podría ser cumplir con los compromisos internacionales

de mitigación, por ejemplo la NDC en el marco del Acuerdo de París, que establece un límite máximo de emisiones en un horizonte temporal definido. A partir de este objetivo de mitigación, es posible calcular el Presupuesto de Carbono disponible.

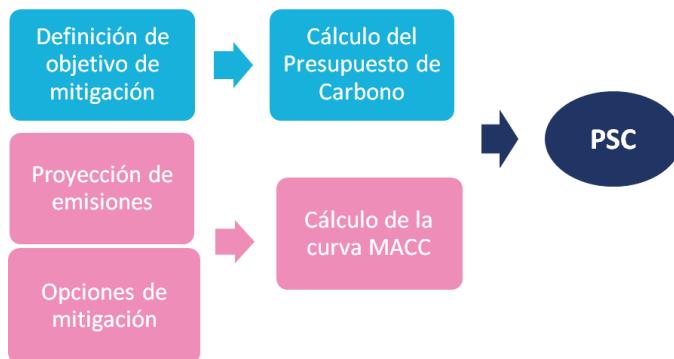


Figura 5 Proceso para determinar el PSC a partir del Precio Sombra del Costo de mitigación para alcanzar un objetivo de política pública

En segundo lugar, a partir de estudios de mitigación, el país puede obtener escenarios futuros de emisiones de GEI y la caracterización de los costos de mitigación, en particular la curva de costos marginales de abatimiento (Curva MAC, de su sigla en inglés). Esta organiza las acciones de mitigación desde la más económica a la más costosa (ver Figura 6), dándonos una guía de cómo ir desde el escenario de Línea Base (o Business As Usual, BAU) al de máxima mitigación de la manera más económica posible. Del cruce del Presupuesto de Carbono con la curva MAC (ver Figura 4 y 6) se obtiene el PSC necesario para cumplir con el objetivo de política pública. Es relevante mencionar los riesgos de esta aproximación en cuanto a los potenciales valores de PSC negativos, tal como se observa en la Figura 6, es posible que esto suceda cuando el objetivo de mitigación no es suficientemente ambicioso (Objetivo de Política Pública 1). Estos casos no son inusuales, ya que los países frecuentemente presentan más de un objetivo de mitigación, ya sea a distintos horizontes temporales (2030 y 2050), así como dependiendo de factores externos como el financiamiento climático (meta condicional e incondicional). Es común que las curvas MAC tengan varias medidas con costos marginales negativos, es decir, que generan beneficios económicos netos independientemente de la externalidad evitada³.

³ Existen múltiples razones por la cual existen medidas con costos de mitigación negativo: tasa de descuento utilizada distinta a la de los tomadores de decisiones en la economía (tasa de descuento privada suele ser mayor a la social), información imperfecta por parte de los tomadores de decisiones (estimar los ahorros energéticos futuros de un equipo no es trivial), diferencia entre quien toma la decisión de inversión y quien percibe los beneficios de esta (ej: una vivienda mejor aislada representa ahorros para quien vivirá en la casa, no para la constructora), así como limitaciones en la consideración de todos los costos en el análisis (ej: ausencia de estimación de los costos de transacción).

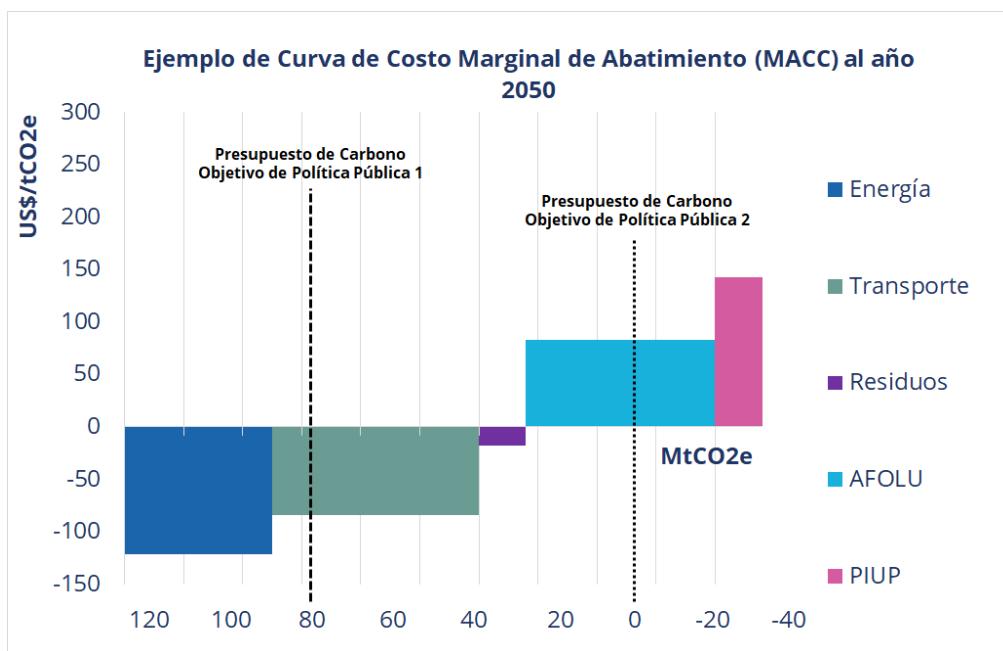


Figura 6 Ejemplo ilustrativo de Curva de costos marginales de abatimiento para el 2050.

Fuente: Elaboración propia.

Los mayores desafíos asociados a esta alternativa metodológica se encuentran en la realización de los estudios de mitigación, donde es necesario realizar una serie de supuestos que van desde la proyección de emisiones tendenciales (Escenario BAU, que representa la trayectoria de sucesos cuando se asume una ausencia de políticas de mitigación), la selección de medidas de mitigación a analizar (y su nivel de penetración), supuestos de costos y período de análisis, hasta la tasa de descuento utilizada, entre otros. En base a esta modelación, es posible calcular la reducción de emisiones de CO₂e que aporta para el cumplimiento del Presupuesto de Carbono una medida i, así como el costo marginal de abatimiento de cada medida i, lo que se obtiene de la aplicación de la siguiente ecuación:

$$\text{Costo Marginal de Abatimiento}_i = \frac{\text{Valor Presente de los Costos Incrementales}_i}{\text{Reducción de Emisiones de GEI}_i}$$

Un elemento relevante para utilizar esta opción es la disponibilidad de curvas de costos marginales de abatimiento, ya sea globales o nacionales. A nivel nacional, las curvas de abatimiento usualmente se analizan al proponer los compromisos nacionales de reducción de emisiones en sus NDCs. No obstante, también existen otras fuentes que permiten realizar el análisis considerando las costos globales de abatimiento:

- En 2007, la consultora McKinsey presentó un estudio (Enkvist et al., 2007) donde se detallan los posibles métodos de reducción de emisiones disponibles a nivel global,

por región geográfica y por sector económico. Para el cálculo se utilizaron las proyecciones desarrolladas por la Agencia de Protección del Medioambiente (*EPA*, por sus siglas en inglés) de Estados Unidos para establecer el escenario "Business As Usual" (*BAU*). A partir de este, se estudiaron los costos marginales de mitigación al año 2030 de cada alternativa de abatimiento respecto al escenario *BAU*, considerando un escenario de mitigación en el que se limitan las concentraciones de GEI en la atmósfera a 450 ppm.

En 2010, se actualizaron estas curvas con el fin de introducir una nueva línea base que refleje la economía global y las emisiones asociadas en un contexto post crisis económica. Los resultados de esta actualización dieron cuenta de que la crisis no tuvo un impacto relevante en las emisiones, y que las curvas se mantienen esencialmente iguales (Enkvist et al., 2010). La última actualización se realizó en 2013, la que incluyó una re-evaluación de disponibilidad y desarrollo de las nuevas tecnologías bajas en carbono y las nuevas tendencias macroeconómicas, entre otros elementos.

Estas curvas fueron utilizadas por el Reino Unido en su primera estimación de PSC (DECC, 2009), y fueron más tarde actualizadas para ser consistentes con las nuevas trayectorias de emisiones y costos de abatimiento propuestas por el IPCC.

Adicionalmente, la consultora elaboró curvas de abatimiento para una serie de países durante el período 2007-2010, tales como Grecia, Polonia, India, Bélgica, Brasil, China, Suiza y Suecia, entre otros.

- Alternativamente, el IPCC ha realizado revisiones exhaustivas de los precios al carbono a distintos horizontes temporales (e.g. 2030, 2050, 2100), bajo distintos modelos y escenarios socioeconómicos y de mitigación. La información recopilada respecto a los escenarios se encuentra públicamente disponible⁴. La plataforma contiene tanto los escenarios del Quinto Informe del Grupo, como los más recientes de 1,5°C publicados en el Informe Especial (SR1.5) del año 2018.

El IPCC también ha publicado reportes con análisis detallado de las tecnologías de mitigación disponibles y sus costos (Fischedick et al., 2011). Debido a que el trabajo del Grupo se lleva a cabo en profundidad, esta información está desactualizada en comparación al desarrollo académico actual. No obstante, se puede seguir considerando una fuente confiable de información y como punto de referencia.

- Otras opciones:
 - GloCaF presenta un mercado global idealizado, donde el libre comercio alcanza un nivel óptimo del 100%. Iguala todas las regiones geográficas y estima que cada una de ellas mitiga al mismo costo marginal para lograr el objetivo global de reducción. El modelo entrega las curvas de costos marginales de abatimiento a nivel global para distintos sectores. Fue

⁴ Ver: <https://iiasa.ac.at/scenario-ensembles-and-database-resources>

- desarrollado por el Department of Energy and Climate Change (*DECC* - ahora Department of Business, Energy and Industrial Strategy, [*BEIS*]) de Reino Unido, y utilizado para el cálculo nacional del PSC. Debido a que aún está en fase de prueba, solo algunas bases de datos se encuentran públicamente disponibles⁵.
- El International Energy Agency (*IEA*), en conjunto con el Fondo Monetario Internacional (*IMF*, por sus siglas en inglés), detallan los costos de abatimiento globales de distintas tecnologías, con valores actualizados, para el sector energético (International Energy Agency, 2020).

Esta aproximación no tiene en cuenta directamente la externalidad asociada al cambio climático, reflejando solo los costos de mitigación asociados a evitarla, por lo que es posible que frente a un objetivo de política pública de baja ambición se obtenga un PSC con valores muy bajos -o eventualmente negativos. Esto último es un sinsentido, dado que los GEI emitidos no dejan de producir un daño social solo porque mitigar las emisiones sea "rentable". Adicionalmente, esta aproximación no genera un óptimo social necesariamente, dado que la señal de precio no es necesariamente igual a la externalidad asociada a la emisión de una tonelada de CO₂e. Otra dificultad potencial es que, en ausencia de un objetivo de mitigación que defina claramente un Presupuesto de Carbono, no es posible implementarla, a menos que se defina un objetivo por un método alternativo. No obstante, debido a que también tiene altos requerimientos de información de antecedentes de mitigación (e.g. costos de capital y de operación de cada medida de mitigación), no se presenta como un método tan sencillo de aplicar.

Definición política basada en evidencia

Existiendo ya décadas de experiencias y estudios asociados a la determinación de Precios al Carbono, es posible recurrir a muchos antecedentes para que un país determine su PSC en base a la evidencia. Esto se puede hacer por medio de la selección del mismo PSC de otros países, un valor en base a literatura científica, recomendaciones de organismos internacionales y/o precios de mercados de carbono. Esto permite acelerar la aplicación de un instrumento sin necesidad de desarrollar modelos complejos para determinar el PSC, avanzando con una señal clara que se basa en la experiencia y aprendizajes de otros actores.

En primer lugar es posible revisar estudios que hayan calculado el CSC o definiciones de PSC por parte de otros países, dado que estos resultados son de alcance global, cualquier

⁵ Ver sitio web de Reino Unido:

<https://data.gov.uk/dataset/a91a4b2a-6948-4c0d-a5b8-c09ef2e604b2/global-marginal-abatement-cost-curves-by-country-sector-and-mitigation-option-2015-2050>

país puede utilizarlos como referencia, por ejemplo Canadá para la definición de su PSC utilizó el valor calculado por el (Interagency Working Group, 2016) para EEUU. En segundo lugar, es posible adoptar un PSC, en base a recomendaciones de Organismos Multilaterales sobre la adopción de Precios al Carbono (ya sea para PSC o para impuestos al carbono), aquí destaca el trabajo realizado por CEPAL (Alatorre et al., 2019), que por medio de un metaanálisis obtiene un valor potencial de 25,83 USD/tCO₂e, pero también hay otros referentes como el FMI (Parry et al., 2021), que recomienda 3 niveles de impuesto al carbono 25, 50 y 75 USD/tCO₂e, en función del nivel de ingresos de un país. Una tercera alternativa, que algunos países han utilizado, es definir su PSC a partir de precios de mercados de carbono, este fue el camino de países como Dinamarca o Chile en su primera definición de PSC.

1. Experiencias de otros países:

Las principales fuentes del CSC son a partir del resultado de la aplicación de los modelos antes mencionados (e.g. PAGE, DICE), u optando por los valores estimados, por ejemplo, en Estados Unidos. Como ya se describió anteriormente, este país realizó una modelación el año 2016 que involucró un comité especializado de académicos de diferentes disciplinas y combinando tres modelos distintos de cálculo, lo que entregó valores de CSC globales a ser utilizados a nivel nacional (ver Tabla 2). Debido al esfuerzo detrás, así como a la confiabilidad de los datos, países como Canadá optaron por adoptar directamente estos valores ajustando solo a moneda nacional y por inflación. Una de las desventajas de utilizar este valor de forma directa se debe a que no considera la ponderación por equidad (*Equity weighting*), es decir, que estima un valor único de CSC más allá del país donde se aplique. Esto es problemático, porque no todos los países han contribuido de la misma manera para llevarnos a la crisis climática actual, ni cuentan con los mismos recursos para enfrentar los costos de mitigación, pudiendo esto afectar sus posibilidades de desarrollo. Por lo tanto, la aplicación del *Equity weighting* permite equilibrar estas diferencias.

Tabla 2: Costos social del CO₂en Estados Unidos, 2020-2050 (en USD₂₀₂₀ por tonelada métrica de CO₂)

Emissions Year	Discount Rate and Statistic			
	5% Average	3% Average	2.5% Average	3% 95 th Percentile
2020	14	51	76	152
2025	17	56	83	169
2030	19	62	89	187
2035	22	67	96	206
2040	25	73	103	225
2045	28	79	110	242
2050	32	85	116	260

Fuente: (Interagency Working Group, 2021)

Al igual que en el caso de CSC, algunos países han desarrollado aproximaciones de cálculo *target-based* en base al contexto global para ser utilizados como valores nacionales. Reino Unido es uno de estos casos (ver Tabla 3), el que además fue uno de los primeros en implementar la metodología del Costo de mitigación para alcanzar objetivo de Política Pública y ha servido como ejemplo para su implementación en otros países, tales como Chile. A diferencia del CSC, los valores de PSC obtenidos con este método dan cuenta del “nivel” esfuerzo de mitigación que un país ha decidido adoptar para cumplir con su objetivo de política pública, por lo que no necesariamente otro país va a tener exactamente la misma ambición. Sin embargo, es un referente de utilidad si se toma en consideración a naciones de condiciones similares.

Tabla 3: Valores de PSC de CO₂ en Reino Unido, 2020-2030 (en GBP₂₀₂₀ por tonelada métrica de CO₂)

Year	Low series	Central Series	High Series
2020	120	241	361
2021	122	245	367
2022	124	248	373
2023	126	252	378
2024	128	256	384
2025	130	260	390
2026	132	264	396
2027	134	268	402
2028	136	272	408
2029	138	276	414
2030	140	280	420

Fuente: (BEIS, 2021)⁶

2. Segundo estudios y literatura

Existe un amplio rango de valores disponibles en literatura para este cálculo, entre los que se encuentran los siguientes:

⁶ La tabla muestra solo los valores al 2030, sin embargo, la estimación se hizo a 2050. Ver: BEIS (2021).

- IPCC: por ejemplo, el Capítulo 2 del SR1.5 contiene rangos de valores de precio al carbono para distintos escenarios (Rogelj et al., 2018). Estos pueden ser utilizados como puntos de referencia o directamente como un promedio, según el escenario a considerar a nivel nacional.
- OECD/IEA & IRENA (2017) realizaron una estimación de la señal de precio al carbono necesaria para promover una transición energética acelerada y de grandes alcances, para lograr un escenario de calentamiento que no supere los 2°C a finales de siglo (presupuesto de carbono global para el sector energético de 790 Gt CO₂ para el período 2015-2100). Respecto a este escenario, estimó valores diferentes para países parte de la OECD, economías emergentes (e.g. Brasil, China, Rusia y Sudáfrica) y otras regiones. Los valores se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4: Resumen de valores de precios al CO₂ en un escenario que limita a 2°C (USD/tCO₂)

	2020	2030	2040	2050
OECD countries	20	120	170	190
Major emerging economies*	10	90	150	170
Other regions	5	30	60	80

* includes People's Republic of China (hereafter "China"), the Russian Federation (hereafter "Russia"), Brazil and South Africa.

Fuente: (OCDE/IEA & IRENA, 2017)

- CDP & CPLC (2018) presentan valores de mercado aplicables al sector privado que son consistentes con un escenario de calentamiento bajo los 2°C de calentamiento. El estudio se basó en las tendencias globales de las empresas de implementar precios al carbono internos, así como en los precios de mercado proyectados de las tecnologías bajas en carbono que se han desarrollado en distintas trayectorias (en línea con los 2°C). El rango de precio varía entre USD 24-50 al año 2020, hasta USD 30-100 al año 2030 (CDP & CPLC, 2018).
- High-Level Commission on Carbon Prices (2017) estimó que una señal de precio consistente con el objetivo establecido en el Acuerdo de París (bajo los 2°C de aumento de tº) debiese ser de entre USD 40-80 a 2020, y USD 50-100 a 2030 (High-Level Commission on Carbon Prices, 2017).
- Tol (2019) presenta una estimación del CSC para cada país basado en los niveles de actividad económica de cada país bajo los escenarios de SRES y SSP en cuanto a población, ingresos y emisiones. Estos escenarios se trabajan de forma proporcional a nivel nacional, de acuerdo a los últimos datos de estos parámetros obtenidos a nivel nacional. El horizonte temporal es de 2015-2100 para la estimación de costos por daños, lo que resulta en un CSC global en 2015 de USD 24 por tonelada de carbono. Para Latinoamérica, el valor es de USD 6,8 (Tol, 2019).

3. Según organismos multilaterales

Diversos organismos han recomendado precios al carbono, los que tienen una fuerte componente regional, como es el caso de CEPAL. Entre éstos se encuentran:

- El IMF estimó en 2021 que lograr la meta de 1,5 y 2°C de calentamiento global requeriría más que la carbono-neutralidad a 2050, y entre las medidas adicionales se especifican impuestos al carbono. Se recomendó que al año 2030 este impuesto al carbono debiese alcanzar un valor de USD 75 por tonelada de CO₂ a nivel global. Además, la recomendación distingue entre distintos niveles de desarrollo para la definición de un precio al carbono debido, por ejemplo, a la intensidad de la producción industrial, pero también considera una distribución más equitativa de la carga. Para economías emergentes se estima un precio de USD 25 al año 2030, para economías de altos ingresos aumenta a USD 50, mientras que para las economías avanzadas el valor llega a USD 75 (Parry et al., 2021).
- La Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) llevó a cabo en 2019 un metaanálisis de la literatura disponible respecto a CSC, con el fin de obtener un valor medio. El valor obtenido es de USD₂₀₁₄ 25,83; sin embargo, se considera un valor conservador debido que subestima las retroalimentaciones del sistema climático e ignora otros procesos socioeconómicos, tales como migraciones. En el caso de América Latina, las retroalimentaciones son particularmente relevantes debido a los potenciales efectos de eventos catastróficos extremos (Alatorre et al., 2019).
- El Banco Mundial elaboró en 2017 una guía de orientación a los proyectos privados que busquen financiamiento en el Banco, para llevar a cabo análisis económicos usando el Precio Sombra del Carbono. Recomienda utilizar los valores entregados por el High-Level Commission on Carbon Prices para el período 2020-2030, y extrapolar desde 2030-2050 usando una tasa de crecimiento de 2,25% anual (Banco Mundial, 2017).

4. Segundo Mercados de Carbono

Los mercados de carbono se dividen en dos grandes tipos: los sistemas de comercio de emisiones (ETS, por sus siglas en inglés) y la compensación de emisiones (*offsets*). El ETS opera bajo el concepto de cap-and-trade, es decir, limitan las emisiones totales de una instalación, región, país o grupo de países, entregando permisos de emisión (*carbon allowances*). Si las emisiones de las fuentes emisoras emitén por sobre o por debajo de este límite máximo, la diferencia puede ser intercambiada en el mercado, ya sea vendiendo los excesos de allowances o comprando excedentes de terceros para compensar. Usualmente este mercado es regulado, es decir, existe un marco normativo que establece dichos límites y procura el cumplimiento por parte de los entes regulados.

Los sistemas offsets, por su lado, pueden ser mecanismos regulados o voluntarios. Los instrumentos regulatorios que los impulsan son del tipo impuesto al carbono y/o como esquema complementario al ETS. Las fuentes emisoras no tienen necesariamente un límite establecido, por lo que el mercado se basa en la comercialización de reducciones con el fin de compensar las emisiones GEI. Estas reducciones se pueden certificar y cumplen con metodologías que entregan lineamientos mínimos de contabilidad.

Dos de los principales instrumentos que permiten la transacción de reducciones son el mecanismo de Implementación Conjunta (JI, por sus siglas en inglés), y el mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL). Estos se crean a partir del Protocolo de Kioto y permiten que los países Anexo I cumplan con sus compromisos de reducción. Ambos mecanismos se consideran como sistemas offsets y difieren del ETS, en particular, por el origen de las reducciones. El JI y MDL permiten el uso de reducciones solo cuando estas ya ocurrieron y han sido verificadas y certificadas. En contraste, en el caso de ETS la transacción ocurre debido al incumplimiento normativo, y las reducciones pueden provenir tanto de los permisos de emisión excedentarios de otros agentes regulados, como de los certificados de reducción de emisiones (CERs, por sus siglas en inglés) otorgados por mecanismos como MDL y JI.

La comercialización de estas reducciones entrega una señal de precio que indica la disposición a pagar por las emisiones. Esta información funciona como *proxy* para el establecimiento de un Precio Social del Carbono.

Esta metodología de cálculo ha sido ampliamente criticada, ya que la señal de precios está distorsionada por otros factores (Ahrens & Ruf, 2016; European Commission, 2012, 2015) según lo evidenciado durante la tercera fase de implementación del mecanismo ETS en la Unión Europea el año 2012. Los límites máximos de emisión no fueron suficientemente estrictos, por lo que los permisos de emisión, en muchos casos, eran mayores a las emisiones reales de las fuentes emisoras. Esto resultó en un exceso de permisos que se comercializaron colapsando el mercado, en el cual el precio decreció a valores cercanos a los €3.00 por tonelada de CO₂ equivalente reducida el año 2013.

Por último, una dificultad transversal de este método es la enorme cantidad de alternativas de PSC a seleccionar, lo que puede hacer difícil tomar la “mejor” decisión.

Benchmark para un Precio Social del Carbono

Se construyó un valor de referencia para lo que debiera ser un PSC a nivel nacional. Este trabajo se basó en un análisis econométrico de las preferencias reveladas de los países que han implementado un PSC a nivel nacional, ver Informe Metodología General para el cálculo del Precio Social del Carbono (SSG, 2022).

Los valores que se obtienen de este análisis dan cuenta de un esfuerzo compatible o coherente con el que ha tomado la comunidad internacional. No refleja un CSC o el costo de mitigación para alcanzar un objetivo de política pública, pero da cuenta del rango en el que debiera estar el PSC de un país en función de su PIB (PPA)⁷ per cápita.

En este análisis se probaron múltiples modelos de regresión (Regresión Lineal Simple, Efectos Aleatorios, etc.) y posibles variables explicativas (PIB per cápita, región, pertenencia a la OECD, país y año de cálculo del PSC). Finalmente, la opción seleccionada debido a su mayor aplicabilidad, pertinencia, ajuste y significancia estadística fue un modelo de Efectos Aleatorios que utilizó como variables el país, año de cálculo del PSC y PIB (PPA) per cápita para explicar el PSC. La Tabla 5 presenta un resumen de los resultados de la regresión seleccionada. Como se puede apreciar, el modelo tiene un ajuste superior al 50% y es significativo estadísticamente.

Tabla 5: Resumen de Modelo de Efectos Aleatorios para estimar Precio Social del Carbono

Parámetro	Valor
Observaciones	24
Entidades	14
R2	0,52
Estadístico F	25,4
Valor P	0,00

Fuente: (SSG, 2022).

Esto permite contar con un modelo para calcular un valor de referencia para el PSC para cualquier país en función de su PIB (PPA) per cápita con el que, complementado al Intervalo de Confianza (IC) de un 95%, podemos obtener un rango de valores de PSC coherentes con las preferencias reveladas internacionalmente por otros países. El resultado del modelo indica que, por cada 1.000 USD 2017 de PIB (PPA) per cápita, el PSC debe subir 1,8 USD 2021/tCO₂e como valor central, y un rango de entre 1 y 2,5 USD 2021/tCO₂e. La Figura 7 representa de manera gráfica el rango de PSC para un país en función de su PIB (PPA) per cápita en USD 2017 (más información sobre los rangos obtenidos para diferentes países se encuentra en (SSG, 2022) y en Anexo III).

⁷ Se refiere al Producto Interno Bruto de un país ajustado por poder adquisitivo en USD constantes del 2017, en base al Banco Mundial (<https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.PP.KD>).



Figura 7 Rango de PSC esperado para un país en función de su PIB per capita
Fuente: (SSG, 2022).

Para el caso del Perú se tiene que, dado su PIB (PPA) per cápita al 2020 fue de 11.261 USD 2017, un PSC del carbono mínimo debiera ser de 11 USD 2021/tCO₂e, un valor esperable debiera ser de 20 USD 2021/t CO₂e, y para ser considerado un país con alta ambición climática debiera tener un PSC superior a los 28 USD 2021/tCO₂e.

Síntesis de ventajas y desventajas de cada método

Como se puede apreciar, existen diferentes opciones metodológicas para la definición de un PSC. Todas las alternativas tienen ventajas y desventajas asociadas, y la Tabla 6 presenta una síntesis de estas.

Tabla 6: Comparación de métodos de estimación del PSC.

Método	Ventajas	Desventajas
Costo Social del Carbono	<ul style="list-style-type: none"> • Es costo eficiente si se implementa para todos los sectores de la economía; • Distintos centros de investigación ya han desarrollado el cálculo y disponibilizado modelos; • Es la alternativa técnicamente más correcta, debido a su 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta complejidad de los modelos; • Es demoroso y costoso si se opta por desarrollar un modelo propio.

	enfoque pigouviano ⁸ , lo que permite alcanzar el óptimo social.	
Costo de mitigación para alcanzar un objetivo de Política Pública	<ul style="list-style-type: none"> • Es costo eficiente si se implementa para todos los sectores de la economía; • Permite contar con un PSC propio alineado a los objetivos nacionales de mitigación. • Se puede desarrollar con un esfuerzo acotado a partir de datos nacionales. 	<ul style="list-style-type: none"> • En caso de no haber un objetivo claro de política pública, se necesita definir si puede realizar el cálculo del <i>Fair share</i> para el país; • Requiere estimar los costos de mitigación nacionales (si no se ha realizado antes). • Si el objetivo de política pública es poco ambicioso, puede haber un PSC negativo
Definición política basada en evidencia	<ul style="list-style-type: none"> • Es costo eficiente si se implementa para todos los sectores de la economía; • Bajo costo y sencillo de definir; • Podría ser el óptimo social si se elige una experiencia de CSC. 	<ul style="list-style-type: none"> • Múltiples opciones obstaculizan la elección del PSC “más apropiado”; • Enfoque de mercados de carbono es muy susceptible a la volatilidad, por lo que no da una señal de largo plazo.

Fuente: Elaboración propia

No obstante el método, implementar un PSC para la evaluación de inversiones públicas será positivo, dado que:

- Permite levantar información y generar capacidades nacionales acerca de los impactos de las decisiones de inversión pública;
- Hace más eficiente económicamente las inversiones públicas, incentivando el análisis de las opciones menos contaminantes y que, eventualmente, podrían ser las opciones más rentables socialmente independiente del PSC;
- Siempre es costo-eficiente si se aplica de forma transversal a todos los sectores, ya que cumple con el principio de equimarginalidad.

⁸ Busca que los agentes económicos internalicen la externalidad negativa a través de la implementación de un impuesto.

Adicionalmente, la implementación de un PSC, permitirá identificar las iniciativas públicas susceptibles de recibir financiamiento climático, ya sean donaciones o financiamiento a tasas preferenciales (ej: Bonos verdes, Fondo Verde del Clima, etc.).

Finalmente, cuando se trata de procesos de actualización del PSC, independiente del método utilizado, es recomendable que este aumente, debido a la naturaleza de la función de daño, esto lo podemos apreciar en la Figura 2 de manera conceptual, además de presentarse en las experiencias de Estados Unidos (Tabla 2), Reino Unido (Tabla 3), entre otras. Esto se debe a que a medida que las concentraciones de GEI aumentan en la atmósfera, se esperan mayores impactos sobre los sistemas humanos, naturales y la economía, por lo que aumentan también los daños.

Requerimientos de información por alternativas

Cada alternativa está sujeta a implementación dependiendo de la información mínima necesaria para desarrollarla. A continuación se detallan los requerimientos de cada una de ellas.

Costo Social del Carbono

No existen modelos desarrollados para cada país, por lo que se utilizan modelos desarrollados por centros de investigación internacionales, que realizan el cálculo a nivel global, dentro de los cuales los más comunes y disponibles en plataformas abiertas son el DICE, FUND y PAGE. Estos modelos también permiten obtener un CSC desagregado por territorio impactado, por ejemplo para Latinoamérica.

Gracias a las plataformas abiertas disponibles en línea, aplicar y correr estos modelos es factible a bajos costos y requerimientos de información. Por lo tanto, el cálculo sólo requiere:

- Seleccionar uno de los tres modelos -o una combinación de estos- (DICE, FUND o PAGE);
- Seleccionar el escenario de emisiones a considerar (si aplica⁹); y
- Definir una tasa social de descuento.

⁹ Cada método trabaja un escenario base de emisiones GEI y ecuaciones matemáticas que determinan cómo estas se traducen a concentraciones atmosféricas y estiman la respuesta del sistema climático a dichos cambios en concentraciones. Las nuevas versiones de los modelos incluyen escenarios más actualizados de emisiones, de acuerdo a los escenarios socioeconómicos desarrollados por el IPCC.

Para este método en particular es recomendable evaluar el daño global para la obtención del CSC, ya que no es posible aislar a las jurisdicciones de los impactos del cambio climático a partir de las emisiones nacionales.

Costo de Mitigación para alcanzar un Objetivo de Política Pública

Este método es el que más requiere de información en comparación a las otras dos alternativas (CSC y basado en evidencia), además estos antecedentes tienen que estar en un formato específico. Existen dos tipos de antecedentes principales que permiten la aplicación de éste método, que son los siguientes:

I. Objetivo de Política Pública (e.g. NDC)

El país debe contar con un objetivo de mitigación claro, a partir del cual se pueda desprender un presupuesto de carbono para un horizonte temporal definido (e.g. una meta de emisiones para un año o periodo). La claridad del objetivo depende de:

- Existe un objetivo de política pública principal dado, que es multisectorial y está claramente definido. Si bien es común la existencia de varios objetivos, este debe ser identificable como el principal en comparación a objetivos/medidas sectoriales, los que también pueden aparecer en documentos oficiales (e.g. NDC, Estrategia de Descarbonización, etc.);
- Del objetivo de política pública es posible desprender un presupuesto de carbono con un valor exacto de emisiones, por ejemplo, la NDC establece que al 2030 no se puede emitir más de 100 millones de toneladas de CO₂e, por el contrario objetivos como un % de energías renovables, o de disminución de la intensidad de carbono de la economía no son útiles, dado que requiere hacer supuestos discutibles para calcular el presupuesto de carbono;
- Alcance sectorial del objetivo de mitigación es claro, ya sea porque abarca todos los sectores emisores o se enfoque solo en uno, por ejemplo, en energía;
- Los GEI considerados para el objetivo de mitigación son claros, especificando los contaminantes incluidos (e.g. emisiones de CO₂, CH₄, N₂O).

II. Antecedentes de Mitigación (e.g. estudios nacionales de mitigación)

Para esto se debe contar con:

- Sectores y GEI considerados consistentes con el Objetivo de Política pública;
- Proyección de emisiones para todos los sectores emisores incluidos en la meta de mitigación, para los siguientes escenarios:
 - Escenario de referencia sin medidas de mitigación (o BAU);

- Escenario de máxima mitigación: en este caso debe ser posible tener un escenario donde se pueda reducir las emisiones más allá del Objetivo de Política Pública.
- Caracterización de las opciones de mitigación para el escenario de máxima mitigación, contando al menos con:
 - El potencial de mitigación de cada medida para el periodo del Presupuesto de Carbono;
 - Costo Marginal de abatimiento incremental para cada medida de mitigación en comparación con el escenario BAU.
- Antecedentes que aseguren que el cálculo del PSC entregue un valor positivo.

Para asegurar la pertinencia de los antecedentes de mitigación respecto al objetivo de este trabajo, se recomienda lo siguiente:

- Que el estudio sea realizado por una agencia de gobierno o encargada por este;
- Que el estudio sea realizado en un contexto consistente con el Objetivo de Política Pública;
- Que el estudio haya sido sometido a un proceso de validación o consulta pública;
- Que el estudio presente una modelación coherente para todos los sectores de emisión (mismos parámetros de modelación y periodos de análisis para todos los sectores);
- Que el estudio presente proyecciones de emisiones nacionales actualizadas, incluyendo los efectos de la pandemia;
- Que la proyección de emisiones nacionales sean consistentes e idealmente fueron calibradas con los inventarios de GEI nacionales;
- Que sea posible acceder a los modelos o al menos a las planillas de cálculo detalladas con los resultados de modelación.

Definición política basada en evidencia

En este caso, no se requiere de antecedentes nacionales complejo, sino más bien seleccionar el tipo de evidencia a considerar (e.g. organismos multilaterales, experiencia internacional) para luego evaluar cuál de las alternativas disponibles, se ajusta mejor al contexto nacional.

En caso de utilizar el *benchmark* propuesto, se debe tener disponibilidad de:

- El PIB (PPA) per cápita nacional más actualizado disponible al momento del cálculo del PSC (e.g. 2020);
- Trayectoria de crecimiento de PIB (PPA) per cápita en caso de querer dejar calculado el PSC para un periodo futuro, por ejemplo del 2022 al 2030 (opcional).

Disponibilidad de información nacional para cálculo del PSC

Se hizo una revisión bibliográfica de la información públicamente disponible de Perú, especialmente basada en levantar toda información relativa a los compromisos nacionales de reducción de GEI, la información histórica, las proyecciones de emisiones nacionales, así como de los modelos utilizados tanto para la proyección de las variables como para el análisis de carteras de medidas de mitigación, las tasas de descuento social utilizadas nacionalmente, y experiencias previas en el cálculo del PSC. Con esta revisión se busca compilar los antecedentes del país, para luego someterlos a evaluación respecto a los requerimientos de información según metodología de estimación del PSC.

Meta de mitigación

El año 2020 Perú presentó a la CMNUCC el reporte de actualización de la Contribución Nacionalmente Determinada, donde ajustó la meta nacional de mitigación según su NDC tentativa presentada en 2015 (Gobierno del Perú, 2020). La actual meta nacional se plantea para el periodo 2021-2030, limitando las emisiones al año 2030 en 208,8 MtCO₂e. Esta meta se refiere al compromiso incondicional del país, es decir, sujeta a las capacidades nacionales. También propuso una meta condicional más ambiciosa (179 MtCO₂e) al mismo año objetivo, sujeta a apoyo internacional. Este compromiso se planteó en base a un escenario de referencia *Business as usual* proyectado al 2030 a partir del 2010, pero indica límites de emisión absolutos (meta fija de emisión). Dicha meta es nacional y cubre todos los sectores del inventario.

La NDC del 2020 presenta una mejora relativa respecto a la NDC de 2015¹⁰, parcialmente desvinculando la meta de los escenarios de referencia proyectados, ya que plantea una meta fija (no relativa) respecto a las emisiones proyectadas al 2030. Esto resulta en mayor certeza de la ambición climática debido a que no está sujeta a actualizaciones del escenario

¹⁰ La previa NDC planteó un objetivo de mitigación relativo al escenario *Business as usual* de un 20% de reducción.

BAU. Además, esta meta es clara respecto al horizonte temporal, alcance y límite de emisiones, a partir de la cual se puede extraer un presupuesto de carbono del año 2030.

Otra consideración a tener en cuenta de la meta a mediano plazo, es su concordancia con los compromisos internacionales, es decir, si su ambición climática está en línea con lo que el país debería reducir para limitar el calentamiento global bajo los 2°C según el Acuerdo de París. Esta evaluación no es un proceso sencillo, ya que existen diferentes criterios para determinar cuál debería ser la contribución del Perú respecto a la meta global (e.g. *Fair share* o contribución justa, proporcionales a sus emisiones). Es relevante considerar este elemento si se pretende aplicar el método basado en “Costo de Mitigación para alcanzar un Objetivo de Política Pública”, ya que eventualmente un objetivo de baja ambición climática puede resultar en un PSC con valor negativo¹¹, como se observa en la Figura 6.

Además de la meta al 2030, Perú planteó el objetivo de carbono neutralidad al 2050, la que está contenida en la Estrategia Nacional ante el Cambio Climático del Perú que se encuentra en proceso de actualización (Ministerio del Ambiente, s. f.). Con fines de apoyar este proceso, se desarrolló el estudio financiado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) que modeló trayectorias de descarbonización para Perú (Quirós-Tortós et al., 2021). En él se describen las trayectorias de emisiones al 2050 y se realiza un análisis de costo-beneficio de cada alternativa en relación a un escenario base. Este escenario de referencia considera una proyección *laissez-faire* a partir de las políticas desarrolladas hasta el 2018, mientras que las proyecciones de descarbonización incluyen y escalan parte de las medidas propuestas en la NDC del 2015. Un elemento relevante de este trabajo es que realiza proyecciones al 2050 incluyendo, por tanto, el objetivo a mediano plazo al 2030 y el de largo plazo al 2050. Además, el estudio presenta un escenario de mayor ambición climática que las actuales metas de mitigación al 2030 planteadas en la NDC 2020, por lo que es útil en la utilización del método “Costo de mitigación para alcanzar un Objetivo de Política Pública”. En base a este estudio es posible relevar un objetivo claro al 2050, con una trayectoria consistente en las décadas previas. De aquí es posible estimar un presupuesto de carbono para el periodo 2020-2050, y anualmente.

Las tres metas nacionales pueden ser consideradas para fines de este estudio, por un lado debido a que representan metas formalizadas por el Perú, y por otro lado, debido a que es necesario evaluarlas en el contexto del cálculo del Precio Social del Carbono. De esta forma, se presenta una cartera de opciones que permiten descartar los valores negativos y/o extremos (muy altos/muy bajos), de ser el caso.

¹¹ El valor negativo de PSC entrega señales contrarias a los compromisos de reducción nacional, ya que favorece los proyectos más emisores.

Información histórica

El último inventario nacional data hasta 2016 (Ministerio del Ambiente, 2021) y ha sido utilizado para la elaboración de proyecciones, como las desarrolladas por el BID - además de otras fuentes para evitar “lagunas” de información al momento de la modelación. Los inventarios no son exhaustivos respecto a algunos GEI y sectores, tales como emisiones de forzantes climáticos distintos del CO₂ (e.g. metano [CH₄]) para el sector Procesos Industriales y Uso de Productos (PIUP). La Figura 8 muestra las emisiones nacionales históricas del Perú según cada uno de sus inventarios.

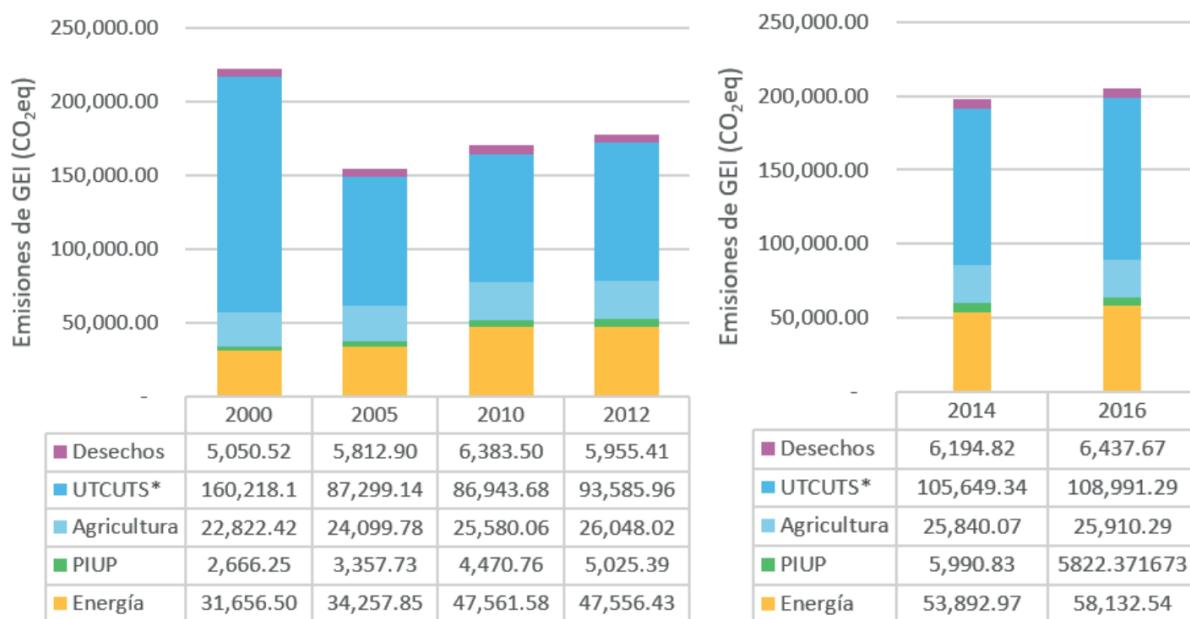


Figura 8 Estimaciones de emisiones GEI históricas del Perú según sus inventarios nacionales (ktCO₂e).

Fuente: (Ministerio del Ambiente, 2021)

Información respecto a la proyección de emisiones

Las proyecciones de emisiones GEI utilizadas en la NDC provienen de proyecciones sectoriales comenzando el 2010 al 2030 desarrolladas por el Grupo de Trabajo Multisectorial de naturaleza temporal para la formulación de la NDC del Perú (GTM-NDC, 2018b). Éstas son proyecciones lineales o tendenciales que mantienen constantes las contribuciones de los sectores en el total nacional, logrando un escenario BAU sin medidas de mitigación consistente con el contexto nacional del 2010. No obstante, esta información

se encuentra altamente disagregada, donde no fue posible acceder a las trayectorias sectoriales modeladas integradas ni sus contribuciones a la meta de reducción nacional. De la misma forma, no se pudo acceder a los escenarios nacionales BAU y de mitigación.

Por su lado, el estudio del BID desarrolló proyecciones tendenciales (ver Figura 9) tanto para el escenario de mitigación de carbono neutralidad como para un escenario de máxima mitigación al 2030. En el caso del BAU, la proyección consideró el 2018 como año base, es decir, asume que no se implementan nuevas medidas, acciones, o políticas de mitigación más allá de las implementadas hasta esa fecha.

Trayectoria de las emisiones de GEI totales por año en Perú en el escenario base y el escenario de carbono-neutralidad bajo supuestos estándar

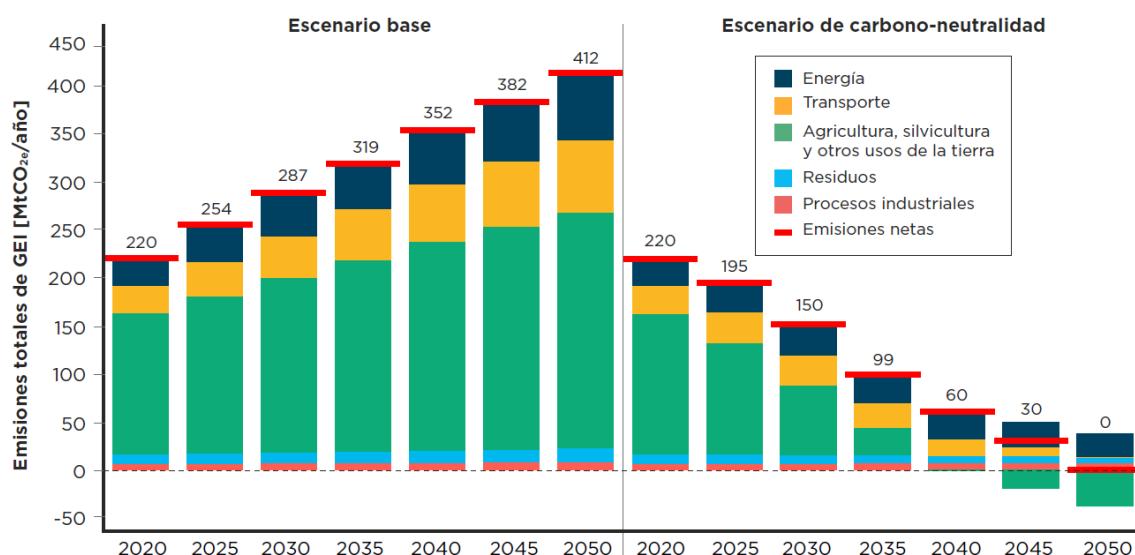


Figura 9 Emisiones nacionales proyectadas para el escenario BAU (izquierda) y de carbono-neutralidad (derecha) al 2050 para el Perú.

Fuente: (Quirós-Tortós et al., 2021)

Las proyecciones presentadas por el BID (2021) estiman reducciones al 2050, incluyendo el periodo 2020-2030, que plantea un escenario de mitigación más ambicioso (emisiones totales de 150 MtCO₂e) que el estimado en la NDC 2020 del Perú (meta condicional: 178 MtCO₂e; e incondicional: 208,8 MtCO₂e). Por consiguiente, estos escenarios pueden ser utilizados como escenarios de máxima mitigación para el objetivo de mitigación de mediano plazo. Esto es particularmente relevante para aplicar el método “Costo de mitigación para alcanzar un Objetivo de Política Pública”. No obstante, debido a que es un escenario de máxima mitigación e implica reducciones de alrededor de 30-50 MtCO₂e más que las metas NDC 2020, los datos deberán ser utilizados en contraste con ambas metas, además de la meta a largo plazo. Esto con el fin de descartar eventuales valores negativos y/o extremos de PSC.

En cuanto a las proyecciones socioeconómicas (e.g. PIB y población), la información utilizada en el estudio del BID se basa en la información entregada por (PAGE, 2017) (ver Figura 10). Mientras que la NDC se basó en información histórica hasta 2015 según el Instituto Nacional de Estadísticas (INEI) y las proyecciones futuras en las estadísticas del World Population Prospects elaborado por el Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas el 2012. Estas tres fuentes de información son de libre acceso. Además, el INEI en el 2021 presentó una actualización de los datos históricos hasta 2017 (INEI, 2021), mientras que el grupo de las Naciones Unidas actualizó su proyección el 2019 con detalles a nivel de país en un horizonte temporal al 2100 (United Nations, 2019).

Supuesto estándar en cuanto a la proyección de población y el PIB en ambos escenarios estudiados

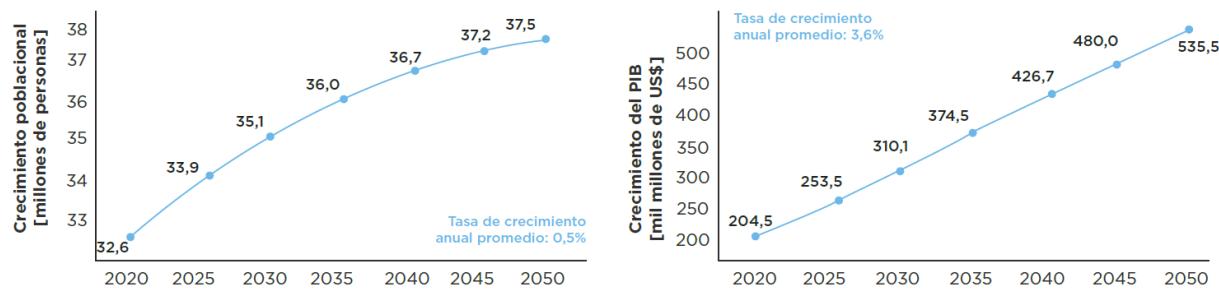


Figura 10 Trayectorias de crecimiento de población y PIB para el Perú al 2050.

Fuente: (Quirós-Tortós et al., 2021)

Medidas de mitigación

En presencia de tres metas de mitigación nacionales, con diferentes horizontes temporales y magnitudes, existen diferentes fuentes de información que permiten lograr dichos objetivos.

Por un lado, el objetivo a mediano plazo planteado en la NDC se sustenta en los estudios realizados por el Grupo de Trabajo Multisectorial el 2018 (GTM-NDC, 2018b). En ellos se detallan las medidas de mitigación para lograr la meta nacional y se desarrolla un Guía para la evaluación de las medidas de mitigación¹². En total se identificaron 76 medidas (GTM-NDC, 2018a) y se realizaron análisis costo-beneficio de cada una de ellas. El resultado de los estudios de las medidas por sector fue la identificación de 62 medidas. Las medidas abarcan todos los sectores de la NDC: Energía; Agricultura; Uso y cambio en el uso del suelo y Silvicultura; PIUP; y Residuos. Para cada sector el GTM-NDC elaboró un informe detallando los escenarios BAU; los potenciales de abatimiento en el año 2030 y acumulado al 2030; año de implementación y término; actores involucrados; evaluación económica en

¹² Para más detalles en el trabajo del GTM-NDC e información asociada al informe final, revisar: https://drive.google.com/drive/folders/1AHwLVn71PaOpdQ_pqVETrSb5rdEnZZVY

base a información referencial de proyectos similares; entre otros. A partir de estas bases de datos es relevante mencionar que:

- Los escenarios *BAU* no son suficientemente detallados para extraer un presupuesto sectorial preciso (deben obtenerse de un gráfico), para luego ser contrarrestado con el presupuesto de carbono nacional;
- Entre los análisis no se evaluaron los costos marginales de abatimiento, a partir de los cuales es posible construir la curva de costos marginales (MACC).

Adicionalmente, esta información se encuentra altamente disagregada, complejizando y demorando el proceso de cálculo del PSC.

Por otro lado, el estudio financiado por el BID realiza un análisis costo-beneficio de cada trayectoria de emisión que permite lograr la carbono neutralidad al 2050. Este incluye todos los sectores: Transporte; Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra; Residuos; Energía; y PIUP. Cada sector es caracterizado en los periodos 2021-2025, 2026-2035 y 2036-2050, detallando sus principales características, emisiones anuales, beneficios netos y costos de operación y capital¹³. Se construyó un modelo integrado a partir de diferentes modelos por sector, donde el sector AFOLU usó un modelo ya existente (De La Torre Ugarte & Ray, 2000); el sector energía y transporte se desarrollaron en base al Sistema de Modelado de Código Abierto de Energía (OSeMOSYS, por sus siglas en inglés); mientras que los sectores residuos y PIUP fueron desarrollados bajo modelos simples producidos por el equipo del BID. El modelo entregó estimaciones de emisiones, y los beneficios y costos de cada sector e integrados.

Ambas fuentes de información son de acceso para el equipo consultor. Aunque los datos trabajados por el GTM-NDC no contienen información suficiente para construir curvas MAC para poder utilizar el método de “Costo de mitigación para alcanzar un Objetivo de Política Pública”. Por esta razón, tampoco es posible determinar con certeza *ex-ante* si el valor del PSC a través de estos trabajos es positivo o negativo. Por otro lado, el proyecto financiado por el BID contiene información a nivel sectorial, no a nivel de medidas de mitigación. Si bien estos permiten construir las curvas MAC de forma promediada por sector, es relevante mencionar que:

- Para la meta de mediano plazo, los valores de PSC tienen una alta probabilidad de ser negativos o muy bajos (menores a los 7 USD/tCO₂e actuales del Perú). Esto es debido a que al interior de cada costo medio de mitigación sectorial, hay decenas de medidas con costos marginales de abatimiento probablemente muy distintos, pudiendo ir desde valores negativos (beneficios netos positivos) a muy positivos (varias veces el valor medio del sector).
- Para la meta de largo plazo, el valor de PSC corresponderá al costo de la última medida considerada en la modelación, puesto que el trabajo no considera un

¹³ Para ver los resultados del estudio se creó una plataforma didáctica:
<http://bit.ly/CBA-Peru-TableauPublic>

escenario de mitigación más allá del objetivo (i.e. más allá de la carbono neutralidad). Por tanto, este valor será la medida más costosa, que corresponde a más de 100 USD/tCO₂e.

Frente a esta incertidumbre, no recomendamos aplicar el método del Costo de mitigación para alcanzar un Objetivo de Política Pública para el Perú.

Tasa social de descuento

Los análisis de costo-beneficio de los proyectos de inversión pública utilizan una tasa de descuento social del 8% (DGPMI, 2021). Esta misma tasa se utilizó para la evaluación económica de las medidas de mitigación analizadas para la NDC (DEE Consultores, 2018).

La tasa del 8% se aplica a proyectos que presentan beneficios sociales hasta 20 años en el futuro, mientras que para proyectos de largo plazo, se aplica una tasa decreciente dependiendo de la duración (ver Tabla 7).

Tabla 7: Tasas sociales de descuento del Perú para proyectos de inversión de largo plazo.

Años	Tasas
21 a 49	5,5%
50 a 74	4,0%
75 a 99	3,0%
100 a 149	2,0%
150 a 199	2,0%
200 a más	1,0%

Fuente: (DGPMI, 2021)

Adicionalmente, el Perú desarrolló y aplicó el método del Costo Social del Carbono el 2016, donde aplicó una tasa social de descuento del 9% (Centro de Investigación de la Universidad del Pacífico, 2016).

Experiencia previa en la fijación de un PSC

El 2016, se calculó el Precio Social del Carbono para el Perú en base a la metodología Costo Social del Carbono, según el modelo DICE/RICE, debido a su simplicidad en el cálculo para

las condiciones de información disponibles al momento de la estimación (Centro de Investigación de la Universidad del Pacífico, 2016).

Este cálculo se basa en la valoración de los daños al comparar las emisiones del escenario *BAU* con el de mitigación, y más específicamente a partir de las emisiones del sector energía. Se utilizó el escenario de mitigación propuesto en la Contribución Nacionalmente Determinada Tentativa (iNDC) publicada el 2015, mientras que el escenario *BAU* se estimó en función de la intensidad energética proyectada al 2030. Bajo esta diferencia de emisiones para ambas trayectorias se calcula el Costo Social del Carbono. Es relevante mencionar que si bien el cálculo se basó en el modelo DICE, existe una diferencia entre el cálculo del Perú y el modelo original, ya que este último busca definir el CSC a partir del cálculo de los daños globales, los que luego son distribuidos regionalmente en el método RICE. Por el contrario, el Perú desarrolla una metodología que considera sólo las emisiones nacionales y valora los daños asociados solo a estas emisiones. Esta aproximación no tiene en cuenta las consecuencias en el clima global de dichas emisiones, por lo tanto simplifica también la cuantificación de los daños al omitir los efectos sobre otras jurisdicciones de las emisiones nacionales, y viceversa.

Algunos supuestos del modelo son:

- La tasa de crecimiento de la población se basa en una función geométrica que se ajusta a las proyecciones de las Naciones Unidas, mientras que los datos históricos se basan en el censo nacional del 2007;
- Las emisiones provenientes del sector energético se consideran endógenas, mientras que las del uso y cambio en el uso de los suelos se consideran exógenas; y
- El modelo incorpora los compromisos de reducción al año 2050 y un escenario nacional proyectado al 2050 a partir del inventario del 2000.

Es importante destacar que algunos elementos de la aplicación de la metodología CSC del Perú requieren ajustes para lograr estimar los valores técnicamente adecuados. Entre estos, es necesario considerar lo siguiente:

- Respecto a las fuentes de información, estas datan de más de una década de antigüedad respecto a la fecha de realización del estudio;
- No se utiliza la última versión del modelo DICE/RICE disponible a la fecha del estudio. La relevancia en su actualización tiene que ver con los cambios en las políticas de mitigación, impactando las trayectorias de emisión y socioeconómicas (Nordhaus & Sztorc, 2013). De la misma manera, los avances académicos de modelación del clima, impactos y valoración de los impactos han permitido construir modelos sofisticados de cálculo de fácil uso, como los desarrollados por *Resources for the Future*¹⁴;
- Al aplicar los modelos y ajustarlos a las condiciones nacionales, éstos debieran mantener los elementos estructurales del modelo, es decir, la estimación debe

¹⁴ Más información sobre la plataforma disponible en: <https://www.mimiframework.org>

realizarse siguiendo los pasos estipulados en la Figura 3 de la sección “Alternativas Metodológicas para la estimación del Precio Social del Carbono” del presente informe;

- Si bien los modelos pueden entregar valores de CSC a nivel nacional, los procesos de cálculo deben incluir todos los procesos físicos, climáticos, socioeconómicos, etc. a nivel global, ya que las emisiones nacionales no excluyen a otras jurisdicciones de sufrir impactos por el cambio climático;
- El modelo DICE/RICE ya tiene incluido un objetivo de mitigación a 2100. La versión del 2011 (según la utilizada en el cálculo por el Perú) presenta un objetivo que es consistente con limitar la temperatura a 2°C por sobre los niveles pre-industriales. A su vez, las emisiones GEI asociadas con alcanzar esta temperatura, se distribuyen proporcionalmente entre 12 regiones en el modelo RICE, donde implícitamente se otorga un presupuesto de carbono regional. Las ecuaciones del modelo están ajustadas de tal forma de lograr dicho objetivo, por lo que reemplazar estos parámetros por valores nacionales (asociados a las políticas climáticas de cada país y no a la contribución proporcional) implica serios problemas de cálculo y estructurales.

Evaluación de alternativas para el cálculo del PSC nacional

Como se discutió anteriormente, los requerimientos de información para cada alternativa metodológica son bastante distintos.

En el caso de la alternativa del “Costo Social del Carbono”, sabemos que no existen modelos nacionales, por lo que para implementar esta opción metodológica, solo es necesario seleccionar alguno (o una combinación) de los modelos abiertos para este fin (DICE, PAGE y FUND), seleccionar el escenario (o una combinación, si aplica) a utilizar y la tasa social de descuento nacional. Por consiguiente, no existe una limitación de la información disponible para utilizar esta alternativa.

Para el caso de la utilización de la “Definición política basada en evidencia”, el informe desarrollado en la primera etapa de este proyecto (SSG, 2022) presenta una amplia revisión de posibles alternativas, lo que se complementa con los resultados del modelo de efectos aleatorios. Este último otorga un valor de referencia o *benchmark* de 20 USD 2021/tCO₂e, con un intervalo de confianza de 11-28 USD 2021/tCO₂e en función del PIB (PPA) per cápita del Perú. Debido a que los valores del PIB (PPA) per cápita son conocidos para años anteriores y que, además, existen antecedentes y fuentes para proyectarlo a futuro, es que se podrían utilizar valores que se encuentren en el rango del *benchmark*, o incluso, usarlo directamente. De lo contrario, el *benchmark* puede ser empleado como punto de referencia para la selección de un PSC en base a otras fuentes de literatura.

Claramente el mayor requerimiento de antecedentes se relaciona con el método del “Costo de Mitigación para alcanzar un Objetivo de Política Pública”, lo que se discute en detalle a continuación, analizando los distintos antecedentes nacionales.

Evaluación de antecedentes para el método de “Costo de Mitigación para lograr un Objetivo de Política Pública”

A partir de la revisión, se identificaron dos fuentes principales de información, una asociada a los objetivos de la NDC al 2030 y la otra al objetivo de carbono neutralidad al 2050. El primero se sustenta en los trabajos realizados por el Grupo de Trabajo Multisectorial de carácter temporal del Perú y los estudios realizados el año 2018. Mientras que el segundo, está apoyado en el trabajo financiado por el Banco Interamericano de Desarrollo el año 2021. Cabe mencionar que este último presenta proyecciones y estimaciones de costos para el periodo 2020-2050, por lo que incluye en su análisis un escenario de máxima mitigación al 2030. Esto implica que entrega datos para lograr más mitigación de la propuesta en la NDC 2020, lo que es un requisito mínimo para aplicar este método de cálculo.

En función de la descripción de estas fuentes de información en la sección anterior, a continuación la Tabla 8, resume los principales elementos para luego ser evaluados respecto a los requisitos mínimos y recomendados de información (ver Tabla 9). Los criterios de evaluación son los ya descritos en la sección “Requerimientos de información por alternativa”, que se categorizan como:

- Requerimientos mínimos: referidos a la disponibilidad de la información; y
- Recomendados: referido a la idoneidad de la información disponible para este trabajo.

Éstos son evaluados bajo tres tipos de valoración asociados a los colores verde, amarillo y rojo. Una valoración en verde indica que dicho criterio se cumple a cabalidad, es decir, toda la información está disponible y es de libre acceso para el equipo consultor. El amarillo indica que existen barreras en el acceso a la información, que se encuentra incompleta y/o que se encuentra altamente desagregada, lo que resulta en mayores costos en tiempo y trabajo. Finalmente, el color rojo indica claramente que dicha información no está disponible, no es de libre acceso o no existe.

Tabla 8: Evaluación de Objetivos de Mitigación para definir un Presupuesto de Carbono para el Perú.

Possible Objetivo de Mitigación	Periodo para el Presupuesto de Carbono	Fuente	¿Objetivo principal?	Alcance sectorial del objetivo de mitigación	GEI considerados	Presupuesto de carbono (Millones tCO ₂ e)
Metas nacionales de mitigación de mediano plazo	2030	NDC 2020	Possible	Todos los sectores del inventario	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, HFC, PFC y SF ₆ .	Incondicional: 208,8 Condicional: 178
Meta nacional de carbono neutralidad - largo plazo	2050	BID 2021	Possible	Todos los sectores del inventario	No especifica	0

Fuente: Elaboración propia

De la tabla anterior se puede apreciar que existe más de un posible Objetivo de Política Pública con diferentes horizontes temporales. No es posible determinar cuál de éstos es el principal, puesto que, si bien, la NDC es el compromiso actualmente formalizado antes la Convención Marco de Naciones Unidas, el objetivo a largo plazo forma parte de la Estrategia de Mitigación de Largo Plazo del Perú, que se encuentra actualmente en proceso de actualización.

Tabla 9: Evaluación de Antecedentes de Mitigación para definir un Presupuesto de Carbono para el Perú.

Antecedente de mitigación	Mínimos						Recomendados						
	1)	2)	3)	4)	5)	6)	7)	8)	9)	10)	11)	12)	13)
NDC (2020) e informe del Grupo de Trabajo Multisectorial (2018)	✓	✗	✗	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗
BID (2021)	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓

- 1) Sectores y GEI considerados consistentes con el Objetivo de Política pública;
- 2) Proyección de emisiones en el escenario de referencia sin medidas de mitigación (o BAU) para todos los sectores emisores incluidos en la meta de mitigación;
- 3) Proyección de emisiones en el escenario de máxima mitigación para todos los sectores emisores incluidos en la meta de mitigación;
- 4) Potencial de mitigación de cada medida para el periodo del Presupuesto de Carbono;
- 5) Costo Marginal de abatimiento incremental para cada medida de mitigación en comparación con el escenario BAU;
- 6) PSC estimado da un valor positivo;
- 7) Realizado por una agencia de gobierno o encargada de este;
- 8) Realizado en un contexto consistente con el Objetivo de Política Pública;
- 9) Fue sometido a un proceso de validación o consulta pública;
- 10) Realizó una modelación coherente para todos los sectores de emisión (mismo parámetros de modelación y periodos de análisis para todos los sectores);
- 11) Presenta proyecciones de emisiones nacionales actualizadas, incluyendo los efectos de la pandemia;
- 12) Proyección de emisiones nacionales son consistentes e idealmente fueron calibradas con los inventarios de GEI nacionales;
- 13) Es posible acceder a los modelos o al menos a las planillas de cálculo detalladas con los resultados de modelación.

Leyenda de colores:

✓: información disponible exactamente como se requiere;

✗: información disponible con dificultad de acceso, disagregada, y/o requiere ser trabajada;

✗: información no disponible, no disponible actualmente, y/o incompleta.

De esta tabla se puede apreciar que ninguno de los antecedentes cumple a cabalidad con los requerimientos mínimos para aplicar el método. Por un lado, los antecedentes del GTM-NDC no son suficientes para lograr los objetivos de este trabajo, ya que no presentan un escenario base para el cálculo de los costos marginales. Además, no es posible determinar *ex-ante* si el valor del PSC será positivo ni su magnitud.

Por otro lado, si bien el trabajo del BID (2021) cumple en mayor medida con los requerimientos de información que el GTM-NDC, sin embargo la información no se encuentra lo suficientemente desagregada. Esto significa que la aproximación pierde mucha resolución, dado que al interior de cada costo medio de mitigación sectorial, hay decenas de medidas con costos marginales de abatimiento probablemente muy distintos, pudiendo ir desde valores negativos (beneficios netos positivos) a muy positivos (varias veces el valor medio del sector). La aplicación de este método de manera exploratoria resultó en PSC extremos dependiendo de la meta seleccionada, por lo que no es recomendable su aplicación con este estudio como referencia.

Cálculo del Precio Social del Carbono

De acuerdo a las evaluaciones llevadas a cabo en las secciones anteriores, el Perú utilizará la aproximación técnicamente correcta para el cálculo del PSC, valorando la externalidad producida por el cambio climático a través del método del “Costo Social del Carbono”. Con el fin de tener un conjunto inicial de valores, que permita seleccionar aquel que se acerque de mejor manera al contexto nacional, se correrán los dos modelos públicamente disponibles y comúnmente más utilizados (DICE y PAGE), usando la tasa social de descuento decreciente del Perú (8-1%) y los valores por defecto utilizados de cada modelo.

A continuación se describe la herramienta de cálculo, el detalle de los modelos utilizados, y sus versiones, el cálculo de la TSD, para luego entregar los resultados obtenidos.

Herramienta de cálculo

El cálculo del Costo Social del Carbono se lleva a cabo en la plataforma *Mimi Framework*¹⁵, desarrollada por el equipo de trabajo *Resources for the Future* (RFF) a través de la iniciativa *The Social Cost of Carbon Initiative*. El equipo, en principio, desarrolló la plataforma de uso abierto con tal que permitiera emplear los modelos utilizados por el IWG de los Estados Unidos. El avance de la plataforma permitió utilizar exactamente los modelos usados el año 2016 e integrar poco a poco las recomendaciones del (National Academies of Sciences, 2017). No obstante, actualmente tiene una amplia variedad de versiones de los modelos, utilizando los parámetros y escenarios por defecto, además de los desarrollados por el IWG.

Para fines de este trabajo, el Costo Social del Carbono se calcula con los modelos más comúnmente utilizados, en sus versiones más actualizadas abiertamente disponibles en la plataforma Mimi Framework. Los modelos son el DICE versión 2016 R2 (Nordhaus, 2018) y PAGE 2020 (Kikstra et al., 2021). Si bien el modelo FUND también ha sido utilizado en el pasado por distintos centros, a la fecha este se encuentra significativamente desactualizado en comparación a sus contrapartes (Waldhoff et al., 2014), sus escenarios de emisión datan de más de 30 años de antigüedad, utilizando escenarios similares a los propuestos por el IPCC en 1992 y con escenarios socioeconómicos de 1995, por lo que se desestimó su uso. Mientras que los modelos DICE y PAGE han realizado las respectivas

¹⁵ Ver <https://www.mimiframework.org/>

tareas de actualización de sus escenarios. Adicionalmente, el modelo FUND presenta ciertas debilidades al momento de estimar los impactos del cambio climático, donde se sobreestima el beneficio en el corto plazo debido, por ejemplo, a beneficios en el sector agrícola de ciertas regiones del planeta gracias a un clima más cálido.

Debido a las características del modelo FUND, el cálculo del CSC para el Perú considera los modelos DICE y PAGE. A continuación se detallan los principales elementos de cada modelo, y el uso de la herramienta de cálculo se presenta en el Anexo I.

Detalles de cálculo de los modelos

Cada modelo presenta estimaciones propias de CSC con valores por defecto y mecánicas de cálculo. Las mayores diferencias entre cada uno de ellos es la forma de incluir las interacciones climáticas y socioeconómicas, por ejemplo, el efecto de los cambios en las precipitaciones sobre la producción agrícola. Otros elementos diferenciadores son las funciones de daño, la sensibilidad climática, inclusión de la adaptación, y los parámetros de entrada. A continuación se detallan las principales características de cada escenario de emisiones y las tasas de descuento propias de cada modelo.

Dynamic Integrated model of Climate and the Economy (DICE)

La última versión de este modelo fue presentada el año 2018 (Nordhaus, 2018), integrando los avances detallados en el Quinto Reporte del IPCC del 2013. A diferencia del modelo anterior, actualiza los valores de forzamiento radiativo de los gases según dicho reporte y los estimados de crecimiento poblacional. Adicionalmente, incluye un elemento adicional llamado “descarbonización”, que busca integrar la razón a la que se reducen las emisiones de CO₂ en el tiempo.

En cuanto a la definición de los principales parámetros de entrada, éstos se determinan como:

- Tasa social de descuento:

$$TSD(t) = (1 + prtp)^{-t}$$

donde R(t) es el factor de descuento, mientras que prtp es la tasa de preferencia temporal, que entrega una ponderación de bienestar respecto a las utilidades de diferentes generaciones (Nordhaus, 2018; Nordhaus & Sztorc, 2013). El valor de prtp utilizado para los cálculos es de 1,5% (prtp=0,015), resultando en una tasa de descuento anual a largo plazo de 4,25% (a 2100).

- Escenario de emisiones:

Proyecta las emisiones al 2305, calculando cada 5 años el valor del CSC. Asume un escenario base de constante crecimiento de las emisiones GEI, alcanzando un valor de 70,9 GtCO₂e/año al 2100, y un acumulado de aprox. 1800 GtCO₂e. De acuerdo al modelo, esto implica un aumento de la temperatura del planeta de aprox. 4,2°C a

finales del siglo, respecto a los valores preindustriales y una concentración de CO₂ en la atmósfera de 827 ppm. Este escenario es cercano al escenario RCP8.5 desarrollado en el Quinto Reporte del IPCC, sin embargo, proyecta menores valores de forzamiento radiativo que resultan en un menor calentamiento.

- Todos los valores de CSC se presentan en dólares estadounidenses del 2010 (USD₂₀₁₀/tCO₂).

Policy Analysis Greenhouse Effect (PAGE)

La última versión de este modelo es el PAGE 2020 construido en función de las versiones anteriores PAGE 2009 y PAGE ICE. Las mayores diferencias son la actualización de los escenarios de emisión, mejoras en la representación del sistema climático al incorporar las retroalimentaciones de la cíosfera y el permafrost del Ártico (e.g. cambios en el albedo). Otro cambio relevante en el modelo es la persistencia de los daños, asumiendo que la economía no mantiene un crecimiento fijo en el tiempo, sino que se ve afectada por los cambios en el clima a futuro.

En cuanto a la definición de los principales parámetros de entrada, éstos se determinan como:

- Tasa social de descuento:

Utiliza la fórmula de Ramsey (ver más detalles en (SSG, 2022)), es decir, la suma entre la tasa de preferencia temporal (PTP), la elasticidad de la utilidad (EMU) (Hope, 2011) y la tasa de retorno del capital ($g(r,t)$). Según el modelo, esta última se interpreta como el crecimiento instantáneo per cápita del PIB ($g(r,t)$), por región (r) en el tiempo (t).

$$TSD = PTP + EMU * g(r,t)$$

Los valores por defecto están dados por el crecimiento esperado de la Unión Europea (1,9%). Los valores utilizados son prtp = 1.0333, por lo tanto la tasa de descuento utilizada en el modelo al 2030 es de 3,25%.

Es relevante mencionar que el modelo, en su cálculo por defecto descuenta los daños por cambio climático haciendo una distribución equitativa de éstos a lo largo del globo. Es decir, toma en cuenta que el mismo daño causa más pérdidas en ciertas regiones que en otras, debido a la vulnerabilidad del lugar y a su nivel de ingreso (Anthoff et al., 2009; Yumashev, 2019).

- Escenario de emisiones:

Se realizan proyecciones hasta 2200 calculando valores a partir del 2015, saltando luego al 2020 y, posteriormente, cada 10 años (e.g. 2030, 2040, 2050). Este modelo ocupa los escenarios *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP), planteando un escenario base “middle of the road” (mitad de camino, en español), que usa el SSP2 en conjunto

con el escenario de emisiones representativo RCP4.5 (Kikstra et al., 2021; Yumashev, 2020). El escenario plantea un peak de emisiones al 2040 y una posterior reducción hasta el 2100, no obstante, el modelo extiende esta reducción al 2300. Se estima un cambio en la temperatura del planeta de 3,5°C respecto a los niveles preindustriales, que se traducen en una concentración de CO₂ en la atmósfera de alrededor de 580 ppm.

- Todos los valores de CSC se presentan en dólares estadounidenses del 2015 (USD₂₀₁₅/tCO₂).

Cálculo y aplicación de la TSD

Debido a los alcances de este trabajo, se utiliza una tasa de descuento decreciente acorde al contexto de cálculo del Costo Social del Carbono, y siguiente los lineamientos que utiliza el Perú para la evaluación de proyectos. La Tasa Social de Descuento decreciente utilizada parte en un 8% para la década del 2020 y cae llegando a un valor de un 1% luego de 200 años (Gobierno del Perú, 2018), tras lo cual se mantiene constante hasta la década del 2300.

El valor presente del daño (VAN) se obtiene a partir de la suma de los daños marginales para cada periodo de tiempo de todas las regiones - en cada modelo por separado-, y al aplicar la tasa de descuento que decrece por periodo. Los valores de los daños marginales sin descontar obtenidos a partir de los modelos se encuentra en el Anexo II.

$$VAN = \sum_t \frac{DM_t}{\prod_{2021}^{t-1} (1+TSD_t)}$$

Donde:

VAN = Valor neto actual de los daños (USD/tCO₂e);

DM_t = Daño marginal en el periodo t (USD/tCO₂e);

TSD_t = Tasa social de descuento marginal para el periodo t (%);

t= Año de modelación desde el 2020 al 2300.

Resultados

La Tabla 10 muestra el resultado al correr los modelos DICE y PAGE con sus valores por defecto, y al aplicar una tasa de descuento decreciente.

Tabla 10. Valores de Costo Social del Carbono para el Perú (USD 2021/tCO₂) para el año 2020.

Modelo	CSC (USD 2021/tCO ₂) - TSD por defecto	CSC (USD 2021/tCO ₂) - TSD decreciente
DICE 2016R2	44	28
PAGE 2020	279	32
Promedio	162	30

Fuente: Elaboración propia.

Existe una evidente diferencia en los valores por defecto debido a las diferencias en las mecánicas de cálculo de cada modelo. Por un lado, cada modelo utiliza sus propias tasas de descuento por defecto, que varían entre 3-5%, lo que implica una valoración del daño distinta. Sumado a esto, las evaluaciones de los impactos para cada modelo son diferentes, resultando en una estimación de los daños anuales incrementales que difieren. Por ejemplo, el modelo DICE utiliza funciones cuadráticas para estimar los daños por el aumento en el nivel del mar, mientras que el modelo PAGE utiliza funciones exponenciales para la misma estimación. Otros elementos diferenciadores son la inclusión de “adaptación al cambio climático”, ya que implica un ajuste a los cambios en el clima, por ejemplo, resultando en una reducción de la vulnerabilidad de la población a medida que existe crecimiento económico. En este caso, solo PAGE hace alusión a este elemento, basándose en estudios econométricos que indican las respuestas de la población al calentamiento, especialmente en el sector agricultura. Estos parámetros en el modelo se tratan como parámetros exógenos que tienen que ver con la implementación de políticas de adaptación.

Con el fin de presentar un punto de referencia de valores, se comparan los CSC obtenidos con el análisis econométrico o *benchmark* descrito en secciones anteriores. Recapitulando, el rango de valores para el Perú es entre 11-28 USD 2021/tCO₂ según su PIB (PPA) per cápita al año 2020, con un estimado esperable de 20 USD 2021/tCO₂. El modelo DICE presenta un PSC dentro del rango, mientras que el PAGE está ligeramente por sobre del límite superior. Se recomienda utilizar el promedio de ambos modelos, dado que es consistente con la tasa de descuento social definida nacionalmente y a que ambos modelos son equivalentes en términos de robustez, este PSC dejaría al país en una zona de alta ambición climática relativa a otras naciones que han avanzado en la materia.

Proyección de PSC futuros

Es una buena práctica en los ejercicios de actualización de los PSC tener una proyección de los valores futuros, dado que permite tener un lineamiento de los futuros PSC, sin necesidad de realizar un ejercicio de actualización, esta buena práctica la podemos ver en las experiencias de Estados Unidos (Tabla 2) y Reino Unido (Tabla 3).

Para el caso del Perú podemos realizar una estimación preliminar de los valores proyectados para el año 2025 y 2030, en base a los modelos DICE y PAGE, usando la tasa de descuento social decreciente del Perú. Los resultados se presentan a continuación.

Tabla 11. Estimación preliminar de PSC futuros para el Perú (USD 2021/tCO₂).

Modelo	PSC para el 2025 - TSD decreciente (USD 2021/tCO ₂)	PSC para el 2030 - TSD decreciente (USD 2021/tCO ₂)
DICE 2016R2	32	36
PAGE 2020	41	49
Promedio	36	43

Fuente: Elaboración propia.

Cabe destacar, que es probable que para los años 2025 y 2030, existan modelos nuevos o versiones actualizadas de los modelos DICE y PAGE, ya sea en términos de la estructura del modelo como en los escenarios de emisiones, por lo que siempre es preferible realizar un nuevo ejercicio de remodelación, sin embargo estos valores proyectados pueden ser de utilidad en caso de que no se haya podido realizar este ejercicio.

Análisis de sensibilidad de la Tasa Social de Descuento

Utilizando la misma aproximación de tasa decreciente usada en este ejercicio de cálculo, se realizó también un trabajo de sensibilidad del cálculo para distintas tasas de descuento. Para esto, se utilizaron los siguientes escenarios:

Tabla 12. Escenarios de tasas de descuento decreciente para el cálculo del Costo Social del Carbono del Perú.

Escenario	Periodos						
	1-20	21-49	50-74	75-99	100-149	150-199	> 200
Base	8,0%	5,5%	4,0%	3,0%	2,0%	2,0%	1,0%
E1	11,0%	5,5%	4,0%	3,0%	2,0%	2,0%	1,0%
E2	10,0%	5,5%	4,0%	3,0%	2,0%	2,0%	1,0%
E3	9,0%	5,5%	4,0%	3,0%	2,0%	2,0%	1,0%
E4	8,0%	5,5%	4,0%	3,0%	2,0%	2,0%	1,0%
E5	4,0%	4,0%	4,0%	3,0%	2,0%	2,0%	1,0%
E6	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	2,0%	2,0%	1,0%

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados del CSC para dichos escenarios se muestran en la Tabla 13. De aquí se aprecia que la tasa de descuento juega un rol fundamental en el cálculo. Pequeñas diferencias en una unidad porcentual para los períodos a corto plazo implican diferencias de hasta 4 USD por tonelada de CO₂ emitida, mientras que estas diferencias se hacen cada vez más extensas conforme las tasas de descuento disminuyen por períodos más largos.

Tabla 13. Costo Social del Carbono para distintas TSD (USD 2021/tCO₂) para el año 2020.

Escenario	DICE 2016 R2	PAGE 2020 ¹⁶
Base	28	32
E1	17	19
E2	20	23
E3	24	27
E4	28	32

¹⁶ Notar que el ejercicio de cálculo para el Perú implicó utilizar una tasa de descuento decreciente, basada en la preferencia temporal, asumiendo una elasticidad del consumo marginal (y/o elasticidad de la utilidad) constante para todas las regiones. Es decir, sin aplicar *equity weighting* al cálculo, tal como lo hace el modelo PAGE 2020 por defecto, sino que agregando los daños globales y descontándolos a valor presente. De aquí se explica la diferencia en los valores obtenidos entre el cálculo por defecto y el actual análisis.

E5	87	86
E6	171	145

Fuente: Elaboración propia.

Como ya se ha mencionado en secciones anteriores, las tasas de descuento buscan hacer comparables los flujos financieros en distintos momentos, esta es una temática particularmente desafiante cuando se trata de escenarios de muy largo plazo que dan cuenta de problemas sociales, intergeneracionales y globales como es el cambio climático. Las principales razones son dos, por un lado, al asumir que las sociedades tendrán mejor situación económica en el futuro, entonces el valor de un dólar en el futuro es menor que el valor de un dólar en el presente. Además, se asume que existe una preferencia temporal en la que las personas prefieren tener ese mismo dólar en el presente que en el futuro. Esto último implica ponderar las generaciones presentes con mayor relevancia que las futuras. Por otro lado, es relevante valorar los impactos del cambio climático en el futuro debido a emisiones en el presente, ya que los gases de efecto invernadero se mantienen por décadas en la atmósfera y el daño que podrían generar en caso de no mitigarse en el presente pueden ser de tal magnitud que sea irreversible y pongan en serio riesgo las posibilidades de desarrollo de las futuras generaciones, lo que contraviene la hipótesis de que estas tendrán una mejor situación económica.

En términos generales, una tasa de descuento alta implica una menor valoración del futuro y, por tanto, se asume que se necesita menor inversión en el presente para proteger a las personas de los impactos futuros. Por el contrario, una tasa de descuento baja otorga una mayor relevancia a las generaciones futuras y busca que las acciones se lleven a cabo en el presente.

Las tasas de descuento decrecientes en el tiempo se han hecho cada vez más aceptadas y han sido ya utilizadas por algunas jurisdicciones, tales como Reino Unido, Francia, Noruega, Dinamarca, Perú, entre otros. Cada uno las ha utilizado de forma distinta, por ejemplo, el Perú la utiliza para los análisis costo-beneficio de proyectos de inversión pública dependiendo del horizonte temporal del proyecto. Reino Unido, utilizó este tipo de tasas en su análisis económico del proyecto de redes de trenes High Speed 2. Determinar el grado de decrecimiento de la tasa de descuento puede ser un proceso complejo. Por ejemplo, puede ser una tasa de reducción exponencial como lo hace el Perú, así logra una tasa de 1% desde un 8% en un periodo de alrededor de 200 años (Gobierno del Perú, 2018)¹⁷(ver Tabla 10). Otra forma de cálculo puede ser aplicar un decrecimiento lineal, como lo ha hecho Reino Unido (Newell & Pizer, 2003) (ver Figura 11). En la mayoría de los casos, la disminución de las tasas de descuento responden a preferencias políticas y se enmarcan

¹⁷ Para más información sobre el método de determinación de la tasa de descuento, revisar: Kamiche, J & Diderot, J. (2018). Actualización de la tasa social de descuento a largo plazo. Ministerio de Economía y Finanzas. Perú.

en los contextos nacionales. Por ende, no existe un método estandarizado de cálculo, ni correcto o incorrecto, más bien depende de cada caso.

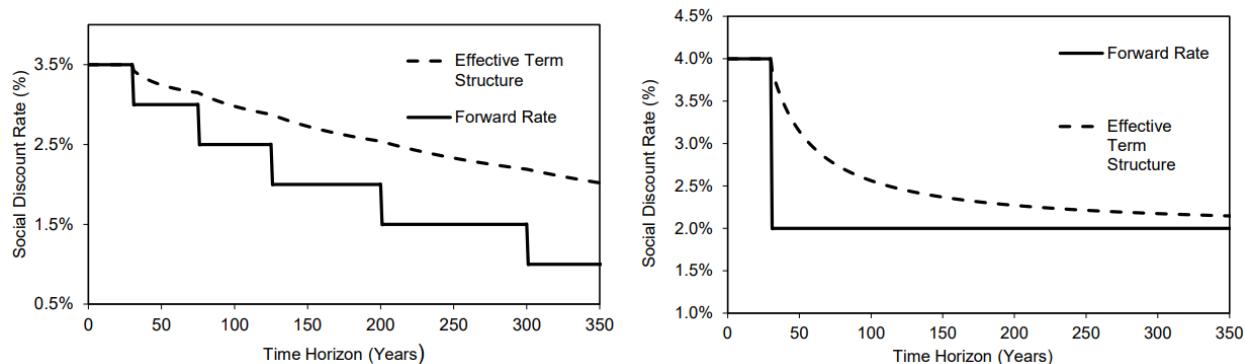


Figura 11 Estructura de decrecimiento de la tasa social de descuento del Reino Unido (izquierda) y Francia (derecha).

Fuente: Adaptado de (Cropper et al., 2014)

Existen diferentes razones por las que se justifica aplicar una tasa de descuento decreciente. En literatura es posible encontrar partidarios de esta aproximación por temas éticos, mientras que otros justifican la preferencia debido a la incertidumbre del crecimiento económico futuro. Es decir, a cortos plazos es posible hacer proyecciones que se ajusten al nivel de tecnología disponible y determinar el retorno del capital. Por el contrario, en el largo plazo no es prudente utilizar altas tasas de descuento, debido a que no se tiene certeza de los escenarios futuros y sus efectos sobre las inversiones (Freeman & Groom, 2016; Groom et al., 2006), por lo que tampoco se tiene certeza del *verdadero* valor presente de dichas inversiones. Sumado a esto, cuando se trata desde la perspectiva del Costo Social del Carbono, se debe tener en cuenta que a largo plazo los impactos del cambio climático no disminuyen, sino que aumentan, casi de forma exponencial. En este contexto, descontar a tasas altas y constantes implica considerar irrelevantes los costos futuros, es decir, subvalorar los daños por los cambios en el clima en el futuro.

En el contexto del Perú, utilizar bajas tasas de descuento (3-5%) no es recomendable, ya que no se condice con la realidad nacional. Por otro lado, tasas cercanas al 8% decrecientes hacia el 2300 son tanto consistentes con sus actuales instrumentos de evaluación de proyectos, como son coherentes con el contexto económico nacional (según su PIB PPA per cápita) -de acuerdo al análisis del *benchmark*- y su ambición climática.

Finalmente, se hizo el análisis de sensibilidad de las proyecciones del Costo Social del Carbono a distintas tasas de descuento. Como se observa, en todos los casos el valor va en aumento para la próxima década. Si bien estos resultados no son directamente comparables con las experiencias internacionales en cuanto a metodologías, es posible distinguir una tendencia por sobre los 100 USD al 2030 al utilizar tasas de descuento menores, e incluso por sobre los 200 USD, como lo es el caso de Reino Unido 393 USD

2021/tCO₂e (280 GBP 2020, ver Tabla 3), Francia 310 USD 2021/tCO₂e (Quinet, 2019) y Alemania 262 USD 2021/tCO₂e (Matthey & Bunger, 2020)¹⁸. Todos estos países utilizan tasas de descuento menores al 4%, tanto de Costo de Mitigación para alcanzar un objetivo de política pública, como de Costo Social del Carbono. Alemania, en particular, ocupa esta última, y una tasa decreciente, no obstante, su tasa disminuye a un 1,5% luego de 20 años donde la pendiente marca una evidente diferencia en el valor obtenido, a diferencia de la tasa del Perú, que tiene una reducción gradual.

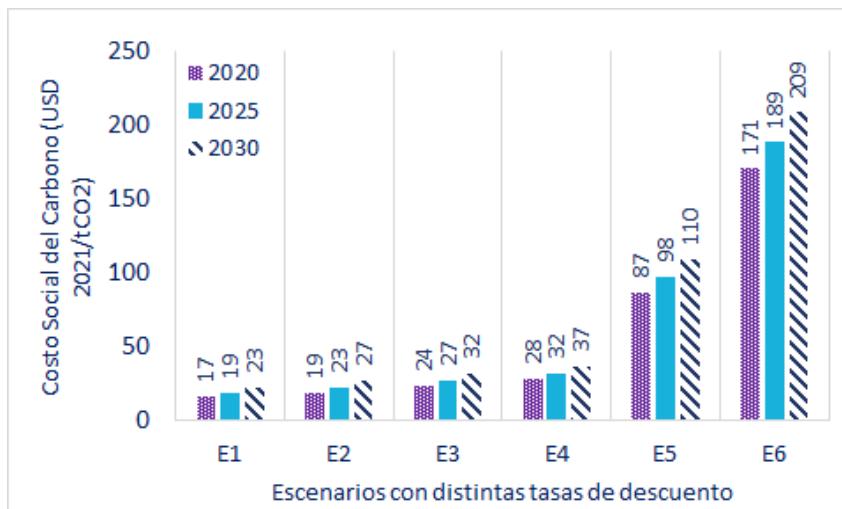


Figura 12 Proyección del Costo Social del Carbono para diferentes tasas de descuento con el modelo DICE 2016 R2.

Fuente: Elaboración propia.

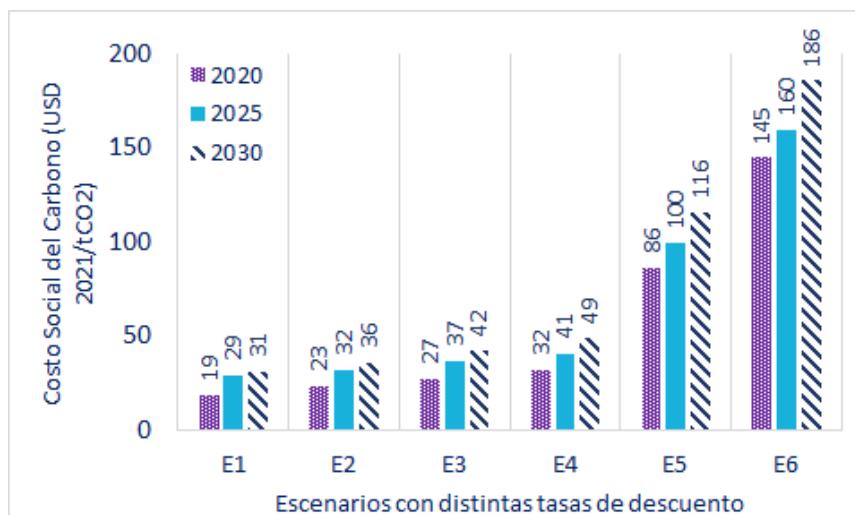


Figura 13 Proyección del Costo Social del Carbono para diferentes tasas de descuento con el modelo PAGE 2020.

Fuente: Elaboración propia.

¹⁸ Para más información de experiencias internacionales, revisar (SSG, 2022).

Costo Social del Carbono actual versus experiencia previa del Perú

Para entender de mejor forma las principales diferencias entre el cálculo realizado como parte de esta consultoría y el realizado previamente por el Perú, es necesario comprender el proceso de cálculo del Costo Social del Carbono. Recapitulando, la Figura 12 muestra las principales etapas y a continuación se hace una comparación de ambos procesos de cálculo (ver Tabla 15).

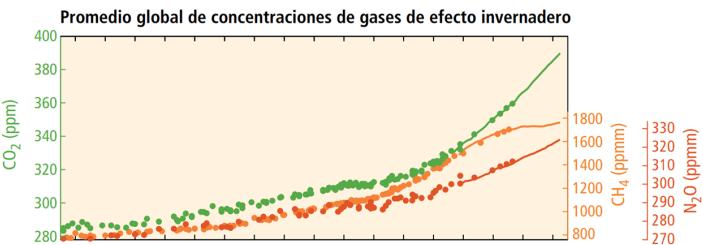


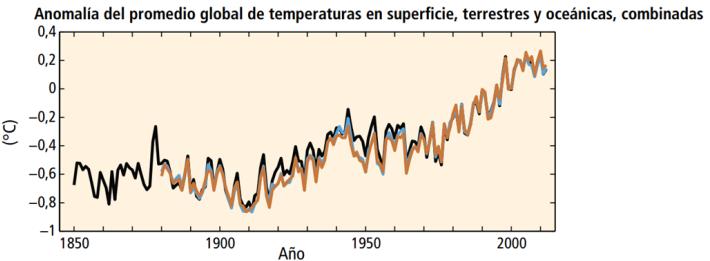
Figura 14. Etapas generales del proceso de cálculo del Costo Social del Carbono.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14. Comparación del cálculo del Costo Social del Carbono del Perú del 2022 y 2016.

Etapas de cálculo	Cálculo DICE 2016 R2 (2022)	Cálculo del Perú (2016)
1. Emisiones de GEI	<p>Emisiones antropógenas de CO₂ anuales</p> <ul style="list-style-type: none"> Considera las emisiones globales de todos los sectores (e.g. energía, IPPU, residuos); Trayectoria de emisiones cercano a un escenario RCP8.5; Proyección al 2300. 	<ul style="list-style-type: none"> Si bien proyecta emisiones nacionales al 2050, el cálculo se realiza solo con las emisiones del sector energía; Trayectoria de emisiones en base a compromisos nacionales;

Etapas de cálculo	Cálculo DICE 2016 R2 (2022)	Cálculo del Perú (2016)
		<ul style="list-style-type: none"> Proyecciones de emisiones al 2050. <p>Reflexión:</p> <ul style="list-style-type: none"> El modelo original está estructurado de tal forma que las emisiones globales son consideradas en el cálculo -y de todos los sectores emisores -, ya que no es posible diferenciar el origen de dichas emisiones y su efecto sobre el sistema climático. Incluso al hacer una bajada regional, como lo hace el modelo RICE, las emisiones de cada región tienen una restricción presupuestaria de emisiones, lo que asume la interconexión entre las regiones. No obstante, el modelo DICE no hace una bajada por país debido a la alta incertidumbre del cálculo. El horizonte temporal de evaluación implica contabilizar los impactos a largo plazo, por lo que horizontes menores significan no incluir en la contabilización tales impactos y daños. Adicionalmente, el Perú realiza una estimación de los cambios en el PIB a futuro (hasta 2100) a partir de aplicar un impuesto a los combustibles. La reflexión sobre este punto se detalla más adelante.
2. Concentraciones de GEI	 <ul style="list-style-type: none"> A través de modelos y funciones matemáticas se relacionan las emisiones y las actividades matemáticas al ciclo del carbono, forzamiento radiativo, entre otras. 	No modelado
	<p>Reflexión:</p> <ul style="list-style-type: none"> Debido a que el cambio climático es un fenómeno global, los impactos sobre los territorios provienen del aumento de la t° global y el desestabilizamiento del sistema climático. Lo que a su vez depende de las concentraciones de GEI en la atmósfera, que aumentan gracias a una mayor 	

Etapas de cálculo	Cálculo DICE 2016 R2 (2022)	Cálculo del Perú (2016)
	<p>emisión. Es relevante considerar la conexión entre estos tres elementos, ya que implica que no importa de donde provengan las emisiones, estas se distribuirán a lo largo del planeta de igual forma, impactando a los territorios de acuerdo a su geografía y no, necesariamente, a su nivel de emisión.</p>	
3. Sistema climático	 <ul style="list-style-type: none"> El modelo ocupa una aproximación propia (basada en los modelos del IPCC, mostrado en la figura adjunta) para estimar la respuesta del sistema climático a cambios en las concentraciones GEI. 	No modelado
	Reflexión: idem anterior.	
4. Impactos del cambio climático	<p>Los daños se estiman como una función cuadrática de los cambios en la temperatura basado en evidencia de estudios previos sobre los impactos del cambio climático en los territorios, en función de las evaluaciones del IPCC y otros autores.</p>	<p>Estimación de los daños se asocia a las pérdidas en el PIB nacional debido a la implementación de un impuesto al carbono sobre los combustibles.</p>
	<p>Reflexión:</p> <ul style="list-style-type: none"> Los impactos del cambio climático pueden abarcar tanto sectores económicos como no económicos, por ejemplo, pueden tener un impacto directo sobre la infraestructura debido a inundaciones, como también pérdidas de ecosistemas y vidas humanas. La valoración de estos impactos no, exclusivamente, se ve reflejada en el PIB y, no es posible determinarla a partir de cambios en el sistema energético únicamente. Por consiguiente, es necesario considerar este tipo de factores al momento de estimar los daños. 	

Etapas de cálculo	Cálculo DICE 2016 R2 (2022)	Cálculo del Perú (2016)
	<ul style="list-style-type: none"> • Es relevante mencionar que los daños no se relacionan con el nivel de emisiones, y esto es especialmente evidente en países del Sur Global, cuya vulnerabilidad al cambio climático es alta, mientras que su contribución en emisiones es menor, como tal es el caso del Perú. • Adicionalmente si cada país/entidad mitigará sus emisiones en función del daño que este les produce solo a ellos, nos llevaría a un subóptimo, dado que la mayoría del daño producido por sus emisiones impacta a otros y a su vez la mayoría del daño recibido es producido por otros, por esto es la mayor expresión de la “tragedia de los comunes” y adoptar un PSC equivalente al CSC global, permite avanzar en su corrección. 	
5. Descuento de flujos	<p>Utiliza una tasa decreciente entre 2020 al 2300, partiendo del 8% hasta llegar a un 1%.</p> <p>Reflexión:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Las tasas de descuento implican una gran variación en los valores, ya que entrega distintas valoraciones a los flujos futuros. Mayores tasas entregan mayor énfasis en las acciones en el presente, mientras que tasas menores implican valorar los daños futuros. 	<p>Utiliza una tasa fija del 9% a 2100 desde 2014.</p>

Recomendaciones

Independientemente del método, siempre es positivo tener un PSC a nivel nacional por 3 razones. En primer lugar, permite levantar información y generar capacidades nacionales acerca de las consecuencias de las decisiones de inversión pública que se están realizando en el país, entendiendo mejor sus impactos en el ciclo de vida del proyecto. En segundo lugar, permite hacer más eficientes, económicamente, las inversiones públicas, al incentivar el análisis de alternativas menos contaminantes, de las que eventualmente se puede descubrir que eran más rentables socialmente, incluso en ausencia de un PSC. En tercer lugar, siempre es costo eficiente si se aplica el mismo PSC para todos los sectores (independiente del valor seleccionado), dado que se cumple con el principio de equimarginalidad, lo que permite mitigar al menor costo posible. Adicionalmente, la implementación de un PSC, permitirá identificar las iniciativas públicas susceptibles de recibir financiamiento climático, ya sean donaciones o financiamiento a tasas preferenciales (ej: Bonos verdes, Fondo Verde del Clima, etc.). Esto último requiere de la concatenación con otras políticas públicas, pero puede habilitar el acceso a recursos que permitan la implementación temprana de las medidas de mitigación.

Es importante reconocer que todos los países tienen responsabilidad asociada a la crisis climática, sin embargo, la carga económica de esta debe ser diferenciadas, teniendo en cuenta los ingresos del país, su contribución histórica a las emisiones globales de GEI, entre otros elementos. Al observar la realidad de los países de Latino América y el Caribe, es recomendable partir con una señal de PSC, aunque sea baja, pero con una planificación para aumentar paulatinamente este valor en el futuro. El modelo econométrico desarrollado, nos provee un *benchmark* en función del PIB (PPA) per cápita que puede orientar esta toma de decisiones, reconociendo las diferencias de ingresos entre países.

Este trabajo busca apoyar al Perú en el cálculo del PSC, y este informe, por consiguiente, entregó un análisis de las alternativas metodológicas actualmente disponibles, de sus necesidades de información y cómo esta puede cumplirse a partir de los antecedentes nacionales para finalmente realizar el cálculo correspondiente del PSC para el Perú.

Teniendo en cuenta que existen antecedentes suficientes para el cálculo del PSC por cualquiera de los métodos, el Perú optó por la metodología técnicamente correcta y acorde a su experiencia previa en el cálculo, el Costo Social del Carbono. Si bien la metodología Costo de mitigación para alcanzar un Objetivo de Política Pública también presenta antecedentes, éstos no cumplen a cabalidad con los requisitos mínimos para el cálculo y una evaluación exploratoria de este método con los últimos antecedentes disponibles implica obtener valores extremos, menores al valor actual y/o negativos o extremadamente altos, dependiendo del objetivo de mitigación seleccionado.

El cálculo utilizó la tasa social de descuento decreciente del Perú, según su Guía de evaluación social de proyectos, que comienza en un 8% hasta lograr un 1% después de 200 años. Los modelos utilizados son las versiones actualizadas de DICE y PAGE que entregan valores por defecto de 44 y 279 USD/tCO₂ (con tasas de descuento entre 3-5%), mientras que con la bajada nacional estos caen a 28 y 32 USD/tCO₂, respectivamente.

Se recomienda utilizar un **PSC de 30 USD2021/tCO₂** para el Perú, que corresponde al promedio de los modelos, ya que es consistente con la realidad nacional - según lo estimado en el benchmark -, representando además una alta ambición climática. El análisis de sensibilidades de las tasas de descuento da cuenta de que altas tasas de descuento tienen variaciones cercanas al 15-20% de los valores por cada unidad de diferencia, mientras que a tasas menores, el CSC aumenta casi al triple cuando la tasa disminuye a la mitad. En este contexto, es recomendable utilizar la tasa de descuento decreciente del Perú de 8%-1%, ya que es consistente con las metodologías de evaluación de proyectos del Sistema de Inversión Pública y, a su vez, permite interiorizar las componentes del cambio climático en dicha evaluación al valorar los daños futuros de forma más equitativa.

La actualización de los precios sociales es un elemento clave dentro del proceso de evaluación de los Sistemas Nacionales de Inversiones, lo que también aplica para el PSC. En este respecto, recomendamos actualizar el cálculo del PSC al menos cada 5 años, por las siguientes razones:

- Los instrumentos relacionados a políticas climáticas debieran estar siempre coordinados con los avances en la ambición climática nacional. En este contexto, una de las principales políticas climáticas de todo país es la Contribución Nacionalmente Determinada, la que debiese ser actualizada cada cinco años, de acuerdo a lo estipulado en el Acuerdo de París, siendo la próxima actualización del Perú el 2025.
- Un ciclo de cinco años permite tener un balance entre los avances científicos que se van desarrollando y certidumbre sobre los nuevos descubrimientos. Esto también permite alinearse con los períodos de evaluación que realiza el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) y las respectivas actualizaciones de los escenarios de emisión. Esto debido a que, es probable que los modelos de evaluación integrada (*IAMs*) se reajusten a los nuevos escenarios, impactos, valoración del daño y actualizaciones de las modelaciones del sistema climático de acuerdo a los nuevos reportes del IPCC.
- Debido a las características de las externalidades asociadas al cambio climático, tanto el CSC como los Costos de Mitigación para alcanzar los objetivos del Acuerdo de París, tienen un comportamiento creciente en el tiempo, por lo que es esperable que el PSC se deba ajustar al alza en los próximas estimaciones (valores recomendados preliminarmente para el 2025 y el 2030 se muestran en la Tabla 11).

- Finalmente, si bien los modelos de cálculo del Costo Social del Carbono son desarrollados por centros de investigación que buscan evaluar los impactos globales, cada país aterriza estas herramientas acorde a su propia realidad. En este caso, dicho ajuste se asoció a utilizar una tasa de descuento acorde del Perú. No obstante, en el futuro, la tasa puede ser actualizada para representar mejor el contexto nacional o, en defecto, se podría optar por usar otro método para el cálculo del PSC.

Sumado a esto, recomendamos que las futuras actualizaciones se realicen con los modelos más actualizados disponibles, ya que entregan una mejor representación del estado del arte en materia de cambio climático, lo que permitirá realizar una mejor estimación del PSC. Finalmente, es relevante mencionar que a medida que se avanza en la ambición climática de los países y del Perú, en particular, será posible actualizar nuevamente el Precio Social del Carbono.

Recomendación para aplicar el PSC a nivel nacional

El uso del PSC es útil en la evaluación de toda inversión y política pública, sin embargo, debe priorizarse para las tipologías de proyectos vinculadas a las medidas de mitigación ya identificadas a nivel nacional en estudios como BID (2021), NDC (2020) e informe del Grupo de Trabajo Multisectorial (2018).

Para los proyectos de inversión pública es relevante al realizar la evaluación social del proyecto, contemplar la evaluación de la alternativa de bajas emisiones, por ejemplo al evaluar un proyecto de transporte público comparar la alternativa de buses eléctricos y no solo la alternativa tradicional.

En la evaluación de políticas públicas de alto impacto en emisiones de GEI, tales como políticas energéticas, transporte, infraestructura, agrícolas, forestales y de conservación de ecosistemas, el uso del PSC puede ser un elemento clave para identificar oportunidades de acción climática, además de poder clasificar con claridad las que podrían requerir de incentivos para su implementación.

Para políticas públicas vinculadas al sector energético, ya sean programas, estrategias o regulaciones, resulta de utilidad utilizar el PSC en los modelos de planificación eléctrica, dado que permitirá identificar la solución de menor costo social en el largo plazo, lo que a su vez permitirá identificar los nuevos proyectos energéticos a priorizar, las centrales que es recomendable desconectar, entre otros.

En general, una vez definido el PSC a nivel nacional, el mayor desafío en su adopción se encuentra en poder realizar la proyección de emisiones asociadas a las distintas alternativas de proyectos y/o políticas públicas por parte de los sectorialistas. Para abordar

esta barrera es recomendable realizar estudios que identifiquen las tipologías de proyectos de inversión más relevantes a nivel nacional, para luego desarrollar metodologías y herramientas que faciliten la evaluación social por parte de los sectorialistas. CEPAL ha realizado una serie de trabajos en la materia para países de la región para proyectos de transporte urbano, infraestructura de transporte interurbano, energía, entre otros; los cuales pueden servir de punto de partida para los desafíos venideros en la implementación del PSC en el Perú.

Referencias

- Ahrens, J., & Ruf, P. (2016). *What the global cap-and-trade community can learn from the EU ETS* (IETA Greenhouse Gas Market, pp. 28–31). IETA.
- Alatorre, J. E., Caballero, K., Ferrer, J., & Galindo, L. M. (2019). *El costo social del carbono: Una visión agregada desde América Latina*. CEPAL.
<https://www.cepal.org/es/publicaciones/44423-costo-social-carbono-vision-agregada-america-latina>
- Anthoff, D., Hepburn, C., & Tol, R. S. J. (2009). Equity weighting and the marginal damage costs of climate change. *Ecological Economics*, 68(3), 836–849.
- Anthoff, D., & Tol, R. S. J. (2013a). The uncertainty about the social cost of carbon: A decomposition analysis using fund. *Climatic Change*, 117(3), 515–530.
<https://doi.org/10.1007/s10584-013-0706-7>
- Anthoff, D., & Tol, R. S. J. (2013b). Erratum to: The uncertainty about the social cost of carbon: A decomposition analysis using fund. *Climatic Change*, 121(2), 413–413.
<https://doi.org/10.1007/s10584-013-0959-1>
- Banco Mundial. (2017). *Shadow price of carbon in economic analysis—Guidance note*.
- BEIS. (2021). *Valuation of greenhouse gas emissions: For policy appraisal and evaluation*. GOV.UK.
<https://www.gov.uk/government/publications/valuing-greenhouse-gas-emissions-in-policy-appraisal/valuation-of-greenhouse-gas-emissions-for-policy-appraisal-and-evaluation>
- Cartes Mena, F. (2021). *Metodología para la estimación del precio social del carbono en Chile y los países de América Latina y el Caribe*. CEPAL.

- <https://www.cepal.org/es/publicaciones/46957-metodologia-la-estimacion-precio-social-carbono-chile-paises-america-latina>
- CDP, & CPLC. (2018). *Carbon Pricing Corridors: The Market View 2018*. CPLC.
- Centro de Investigación de la Universidad del Pacífico. (2016). *Estimación del Precio Social del Carbono para la Evaluación Social de Proyectos en el Perú* (Informe Final). Dirección General de Inversión Pública del Ministerio de Economía y Finanzas.
- Cropper, M. L., Freeman, M. C., Groom, B., & Pizer, W. A. (2014). Declining Discount Rates. *American Economic Review*, 104(5), 538–543. <https://doi.org/10.1257/aer.104.5.538>
- De La Torre Ugarte, D. G., & Ray, D. E. (2000). Biomass and bioenergy applications of the POLYSYS modeling framework¹¹Paper prepared for presentation at the Modeling Tools for Biomass and Bioenergy Conference, 8–10 April 1997 Knoxville, TN. *Biomass and Bioenergy*, 18(4), 291–308. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(99\)00095-1](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(99)00095-1)
- DECC. (2009). *Carbon Valuation in UK Policy Appraisal*. Gobierno de Reino Unido. <https://www.gov.uk/government/publications/carbon-valuation-in-uk-policy-appraisal-a-revised-approach>
- DEE Consultores. (2018). *Guía Metodológica para la Evaluación Económica de las Medidas de Mitigación del Cambio Climático—Producto 2: Documento Conceptual (versión final)*. Ministerio del Ambiente, Gobierno del Perú.
- DGPMI. (2021). *Nota Técnica para el uso de los Precios Sociales en la Evaluación Social de Proyectos de Inversión*. Dirección General de Programación Multianual de Inversiones, Ministerio de Economía y Finanzas, Gobierno del Perú. https://www.mef.gob.pe/contenidos/inv_publica/anexos/anexo2_RD006_2021EF6301.pdf
- Enkvist, P.-A., Dinkel, J., & Lin, C. (2010). *Impact of the financial crisis on carbon economics*:

- Version 2.1 of the global greenhouse gas abatement cost curve.* McKinsey.
- Enkvist, P.-A., Nauclér, T., & Rosander, J. (2007). *A Cost curve for greenhouse gas reduction* (Nº 1; Tha McKinsey Quarterly). McKinsey.
- European Commission. (2012). *The state of the European carbon market in 2012* (Report from the Commision to the European Parliament and the council COM(2012) 652 Final).
- European Commission.
- European Commission. (2015). Annex: Climate Action progress report, including the report on the functioning of the European carbon market and the report on the review of Directive 2009/31/EC on the geological storage of carbon dioxide. En *Report on the functioning of the European carbon market*.
- Fischedick, M., Schaeffer, R., Adedoyin, A., Akai, M., Bruckner, T., Clarke, L., Krey, V., Savolainen, I., Teske, S., Ürge-Vorsatz, D., Wright, R., Luderer, G., Baker, E., & Riahi, K. (2011). Mitigation Potential and Costs. En O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlomer, & C. von Stechow (Eds.), *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation* (pp. 791–864). Cambridge University Press.
- <https://doi.org/10.1017/CBO9781139151153.014>
- Foley, D., K. (2009). The Economic Fundamentals of Global Warming. En J. M. Harris & N. R. Goodwin (Eds.), *Twenty-First Century Macroeconomics: Responding to the Climate Challenge*. Edward Elgar Publishing.
- Freeman, M., & Groom, B. (2016). How certain are we about the certainty-equivalent long term social discount rate? *Journal of Environmental Economics and Management*, 79, 152–168.
- Gobierno del Perú. (2018). *Anexo Nº11: Parámetros de evaluación social*. Gobierno del Perú.

https://www.mef.gob.pe/contenidos/inv_publica/anexos/anexo11_directiva001_2019EF6301.pdf

Gobierno del Perú. (2020). *Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional del Perú: Reporte de Actualización periodo 2021-2030.*

<https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Peru%20First/Report%20de%20Actualizaci%C3%B3n%20de%20las%20NDC%20del%20Peru%CC%81.pdf>

Groom, B., Hepburn, C., & Koundouri, P. (2006). Implications of Declining Discount Rates for UK Climate Change Policy. En D. Pearce, *Environmental Valuation in Developed Countries* (p. 1837). Edward Elgar Publishing.

<https://doi.org/10.4337/9781847201768.00012>

GTM-NDC. (2018a). *Catálogo de Medidas de Mitigación*. Ministerio del Ambiente, Gobierno del Perú.

<https://www.gob.pe/institucion/minam/informes-publicaciones/357226-catalogo-de-medidas-de-mitigacion>

GTM-NDC. (2018b). *Informe Final: Grupo de Trabajo Multisectorial de naturaleza temporal encargado de generar información técnica para orientar la implementación de las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (GTM-NDC)*. Ministerio del Ambiente, Gobierno del Perú.

Hardin, G. (1968). The Tragedy of the Commons. *Science*, 162(3859), 1243–1248.

High-Level Commission on Carbon Prices. (2017). *Report of the High-Level Commission on Carbon Prices*. Carbon Pricing Leadership Coalition.

https://static1.squarespace.com/static/54ff9c5ce4b0a53deccfb4c/t/59b7f2409f8dce5316811916/1505227332748/CarbonPricing_FullReport.pdf

- Hope, C. (2013). Critical issues for the calculation of the social cost of CO₂: Why the estimates from PAGE09 are higher than those from PAGE2002. *Climatic Change*, 117(3), 531–543.
- Ibarrarán, M. E. (2010). *Externalidades, Bienes Públicos y Medio Ambiente*. Departamento de Economía, Universidad de las Américas.
- INEI. (2021). *INEI presenta síntesis estadística de 200 años del Perú*. <https://www.inei.gob.pe/prensa/noticias/inei-presenta-sintesis-estadistica-de-200-anos-del-peru-12995/>
- Interagency Working Group. (2021). *Technical Support Document: Social Cost of Carbon, Methane, and Nitrous Oxide. Interim Estimates under Executive Order 13990*.
- International Energy Agency. (2020). *Sustainable Recovery: World Energy Outlook Special Report*. OECD. <https://doi.org/10.1787/3f36f587-en>
- Kikstra, J. S., Waidelich, P., Rising, J., Yumashev, D., Hope, C., & Brierley, C. M. (2021). The social cost of carbon dioxide under climate-economy feedbacks and temperature variability. *Environmental Research Letters*, 16(9), 094037. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1d0b>
- Leach, N. J., Jenkins, S., Nicholls, Z., Smith, C. J., Lynch, J., Cain, M., Walsh, T., Wu, B., Tsutsui, J., & Allen, M. R. (2021). FalRv2.0.0: A generalized impulse response model for climate uncertainty and future scenario exploration. *Geoscientific Model Development*, 14(5), 3007–3036. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-3007-2021>
- Matthey, A., & Bunger, B. (2020). *Methodenkonvention 3.1 zur Ermittlung von Umweltkosten*. German Environment Agency (UBA). https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-12-21_methodenkonvention_3_1_kostensaetze.pdf

Ministerio del Ambiente. (s. f.). *Estrategia Nacional ante el Cambio Climático al 2050.*

Recuperado 2 de abril de 2022, de

<https://www.gob.pe/institucion/minam/campa%C3%B1as/3453-estrategia-nacional-ante-el-cambio-climatico-al-2050>

Ministerio del Ambiente. (2021). *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero del año 2016 y actualización de las estimaciones de los años 2000, 2005, 2010, 2012 y 2014.*

Ministerio del Ambiente, Gobierno del Perú.

https://infocarbono.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2021/06/INGEI_2016_Junio-2021_Final.pdf

National Academies of Sciences, E. (2017). *Valuing Climate Damages: Updating Estimation of the Social Cost of Carbon Dioxide.* <https://doi.org/10.17226/24651>

Newell, R., & Pizer, W. (2003). Discounting the distant future: How much do uncertain rates increase valuations? *Journal of Environmental Economics and Management*, 46, 52–71.

Nicholls, Z. R. J., Meinshausen, M., Lewis, J., Gieseke, R., Dommenget, D., Dorheim, K., Fan, C.-S., Fuglestvedt, J. S., Gasser, T., Golüke, U., Goodwin, P., Hartin, C., Hope, A. P., Kriegler, E., Leach, N. J., Marchegiani, D., McBride, L. A., Quilcaille, Y., Rogelj, J., ... Xie, Z. (2020). Reduced Complexity Model Intercomparison Project Phase 1: Introduction and evaluation of global-mean temperature response. *Geoscientific Model Development*, 13(11), 5175–5190. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-5175-2020>

Nordhaus, W. (2010). *Economic aspects of global warming in a post-Copenhagen environment.* 107(26), 11721–11726.

Nordhaus, W. (2017). *Evolution of Assessments of the Economics of Global Warming: Changes in the DICE model, 1992 – 2017* (Nº w23319; p. w23319). National Bureau of Economic

Research. <https://doi.org/10.3386/w23319>

Nordhaus, W. (2018). Projections and Uncertainties about Climate Change in an Era of Minimal Climate Policies. *American Economic Journal: Economic Policy*, 10(3), 333–360.

<https://doi.org/10.1257/pol.20170046>

Nordhaus, W., & Sztorc, P. (2013). *DICE 2013R: Introduction and User's Manual*.

OCDE/IEA, & IRENA. (2017). Chapter 2: Energy Sector Investment to Meet Climate Goals. En *Perspectives for the Energy Transition: Investment Needs for a Low-Carbon Energy System*.

Paavola, J. (2012). Climate Change: The Ultimate Tragedy of the Commons? En D. H. Cole & E. Ostrom (Eds.), *Property in Land and Other Resources* (pp. 417–433). Lincoln Institute of Land Policy.

https://www.lincolninst.edu/sites/default/files/pubfiles/climate-change_0.pdf

PAGE. (2017). *Perú: Crecimiento Verde—Análisis cuantitativo de políticas verdes en sectores seleccionados de la economía*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

Parry, I., Black, S., & Roaf, J. (2021). *Proposal for an International Carbon Price Floor Among Large Emitters* (IMF Staff Climate Notes N° 2021/001). International Monetary Fund.

<https://www.imf.org/en/Publications/staff-climate-notes/Issues/2021/06/15/Proposal-for-an-International-Carbon-Price-Floor-Among-Large-Emitters-460468>

Pindyck, R. S. (2013). *Climate Change Policy: What Do the Models Tell Us?* 51(3), 860–872.

Price, R., Thornton, S., & Nelson, S. (2007). *THE SOCIAL COST OF CARBON*. 24.

Quinet, A. (2019). *The Value for Climate Action: A shadow price of carbon for evaluation of investments and public policies*. France Stratégie.

Quirós-Tortós, J., Godínez-Zamora, G., De La Torre Ugarte, D., Heros, C., Lazo Lazo, J., Ruiz,

- E., Quispe, B., Diez Canseco, D., Garro, F., Mora, J., Eguren, L., Sandoval, M., Campos, S., Salmeri, M., Baron, R., Fernández-Baca, J., Iju Fukushima, A. S., Saavedra, V., & Vogt-Schilb, A. (2021). *Costos y beneficios de la carbono-neutralidad en Perú: Una evaluación robusta | Publications*. Banco Interamericano de Desarrollo.
<https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Costos-y-beneficios-de-la-carbono-neutralidad-en-Peru-Una-evaluacion-robusta.pdf>
- Rogelj, J., Shindell, D., Jiang, K., Fifita, S., Forster, P., Ginzburg, V., Handa, C., Kobayashi, S., Kriegler, E., Mundaca, L., Séférian, R., Vilariño, M. V., Calvin, K., Emmerling, J., Fuss, S., Gillett, N., He, C., Hertwich, E., Höglund-Isaksson, L., ... Schaeffer, R. (2018). Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development. En *IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development and efforts to eradicate poverty* (p. 82). In Press.
- SSG. (2022). *Estimación del Precio Social del Carbono para América Latina y el Caribe: Alternativas metodológicas para su cálculo por parte de los Sistemas Nacionales de Inversión Pública* (Estimación del Precio Social del Carbono para América Latina y el Caribe). Comisión Económica para América Latina y el Caribe.
- Stern, N., Stiglitz, J. E., & Taylor, C. (2022). *The Economics of immense risk, urgent action and radical change: Towards new approaches to the economics of climate change* (Nº w28472). National Bureau of Economic Research.
- Tol, R. S. J. (2011). The Social Cost of Carbon. *Annual Review of Resource Economics*, 3(1), 419–443. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-083110-120028>
- Tol, R. S. J. (2019). A social cost of carbon for (almost) every country. *Energy Economics*, 83,

555–566. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2019.07.006>

United Nations. (2019). *World Population Prospects 2019- Population Division*.

<https://population.un.org/wpp/>

Waldhoff, S., Anthoff, D., Rose, S., & Tol, R. S. J. (2014). The Marginal Damage Costs of Different Greenhouse Gases: An Application of FUND. *Economics*, 8(1), 20140031.

<https://doi.org/10.5018/economics-ejournal.ja.2014-31>

Yumashev, D. (2019). *PAGE-ICE IAM, v6.22—Technical Description*. Pentland, Lancaster University.

Yumashev, D. (2020). PAGE-ICE Integrated Assessment Model. *Oeconomia Editions*.

[https://www.research.lancs.ac.uk/portal/en/publications/pageice-integrated-assessment-model\(2997e88d-f379-4891-8db7-de0dddbec239\).html](https://www.research.lancs.ac.uk/portal/en/publications/pageice-integrated-assessment-model(2997e88d-f379-4891-8db7-de0dddbec239).html)

Yumashev, D., Hope, C., Schaefer, K., Riemann-Campe, K., Iglesias-Suarez, F., Jafarov, E., Burke, E. J., Young, P. J., Elshorbany, Y., & Whiteman, G. (2019). Climate policy implications of nonlinear decline of Arctic land permafrost and other cryosphere elements. *Nature Communications*, 10(1), 1900.

<https://doi.org/10.1038/s41467-019-09863-x>

Anexo I: Mimi Framework

Mimi se basa en el lenguaje de programación “Julia”, que es un código abierto bajo la licencia de software MIT¹⁹. El código se encuentra en línea en Github, y los paquetes de IAMs pueden ser instalados y trabajados localmente en un computador estándar, mediante la conexión a los servidores correspondientes.

Ya instalados Julia y Mimi, es posible acceder al registro de modelos que posee Mimi (ver Figura 10), que incluye los modelos trabajados en este documento. Además de estos, existen otros modelos que utilizan Mimi para el cálculo, y cada uno debe ser descargado de forma individual.

```
Julia 1.7.2
Documentation: https://docs.julialang.org
Type "?" for help, "]?" for Pkg help.
Version 1.7.2 (2022-02-06)
Official https://julialang.org/ release

julia> using Mimi
(@v1.7) pkg> registry add https://github.com/mimiframework/MimiRegistry.git
```

Figura A1. Ejemplo de descarga del registro de modelos de Mimi en el software Julia.

Fuente: Elaboración propia.

El cálculo del CSC con los valores por defecto de cada modelo es sencillo, los pasos en la plataforma son:

1. Para comenzar, se especifica a Julia que se está utilizando Mimi:

`Julia> using Mimi`

2. Luego, se precisa el modelo que se pretende utilizar, por ejemplo DICE y su versión disponible en la plataforma, para luego ser descargado como paquete IAM en el Julia:

Ejemplo 1: `Julia> using MimIDICE2016`

Ejemplo 2: `Julia> using MimIDICE2013`

¹⁹ Ver licencia de uso del software en: <https://github.com/JuliaLang/julia/blob/master/LICENSE.md>

Los modelos se llaman según el nombre del paquete disponible en la plataforma Mimi (Figura 11).

- [MimiFUND.jl](#)
- [MimiDICE2010.jl](#)
- [MimiDICE2013.jl](#)
- [MimiDICE2016.jl](#) (version R not R2)
- [MimiDICE2016R2.jl](#)
- [MimiRICE2010.jl](#)
- [MimiSNEASY.jl](#)
- [MimiFAIR.jl](#)
- [MimiFAIR13.jl](#)
- [MimiPAGE2009.jl](#)
- [MimiPAGE2020.jl](#)
- [MimiMAGICC.jl](#)
- [MimiHECTOR.jl](#)
- [MimiCIAM.jl](#) (currently in closed BETA)
- [Mimi-BRICK.jl](#) (currently in closed BETA)
- [mimi_NICE](#)

Figura 11: Listado de modelos que utilizan Mimi y sus respectivos nombres de paquetes.

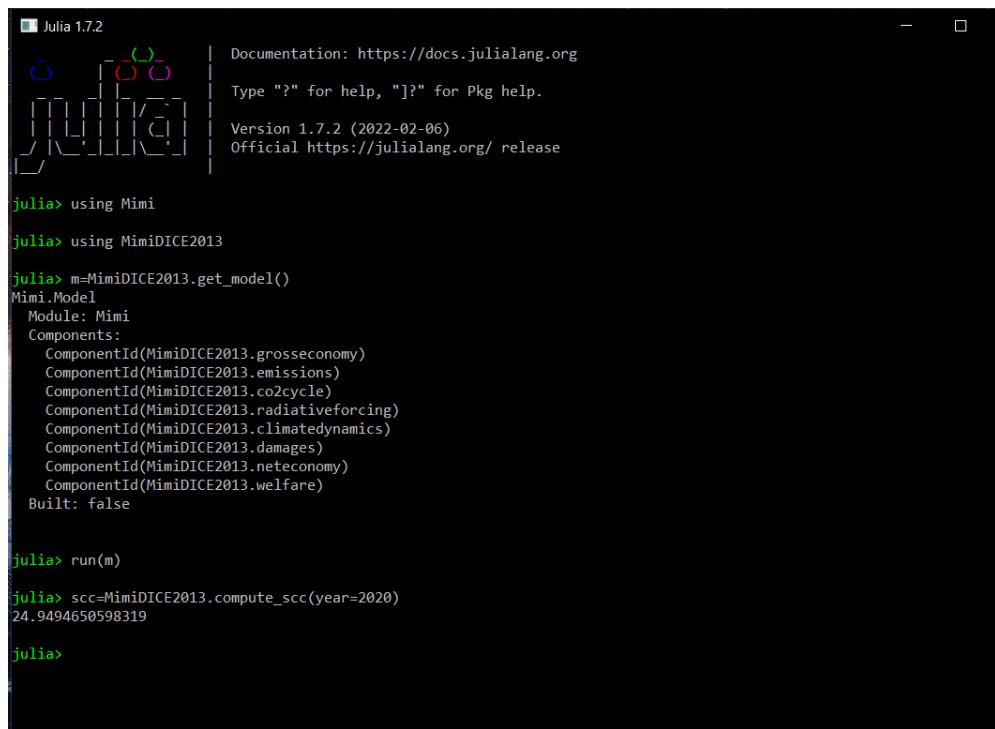
Fuente: <https://www.mimiframework.org/>

3. Posteriormente, ya teniendo acceso al modelo en línea, se ocupa la función “obtener modelo”, que entrega una copia de este con sus valores por defecto, y se corre:

```
Julia> m = MimiDICE2013.get_model()
Julia> run(m)
```

4. Desde este punto se puede realizar el cálculo del CSC para distintos años y con distintas tasas de descuento. Al especificar solo el año, todos los demás valores se entregan por defecto (Figura 12).

```
julia> scc=MimiDICE2013.compute_scc(year=2020)
```



```
Julia 1.7.2
Documentation: https://docs.julialang.org
Type "?" for help, "]?" for Pkg help.
Version 1.7.2 (2022-02-06)
Official https://julialang.org/ release

julia> using Mimi
julia> using MimiDICE2013
julia> m=MimiDICE2013.get_model()
Mimi.Model
  Module: Mimi
  Components:
    ComponentId(MimiDICE2013.grosseconomy)
    ComponentId(MimiDICE2013.emissions)
    ComponentId(MimiDICE2013.co2cycle)
    ComponentId(MimiDICE2013.radiativeforcing)
    ComponentId(MimiDICE2013.climatedynamics)
    ComponentId(MimiDICE2013.damages)
    ComponentId(MimiDICE2013.neteconomy)
    ComponentId(MimiDICE2013.welfare)
  Built: false

julia> run(m)
julia> scc=MimiDICE2013.compute_scc(year=2020)
24.9494650598319
julia>
```

Figura A2. Etapas de cálculo del CSC en Julia usando Mimi.

Fuente: Elaboración propia.

Anexo II: Salidas de modelos CSC

A continuación se presentan los daños marginales obtenidos de los modelos PAGE versión 2020 y DICE versión 2016 R2.

Tabla A.1: Salidas del modelo PAGE 2020, proyección 2020-2300.

Año	Daño marginal del periodo (USD/tCO ₂)	Daños acumulados (USD/tCO ₂)
2020	0	0
2030	3,0984039	3,0984039
2040	11,979503	15,0779069
2050	34,704204	49,7821109
2075	106,70557	156,487681
2100	269,79559	426,283271
2150	694,8307	1121,11397
2200	1149,4882	2270,60217
2250	1662,9819	3933,58407
2300	1071,9636	5005,54767

Fuente: Elaboración propia a partir del uso de la plataforma Mimi Framework.

Tabla A.2: Salidas del modelo DICE 2016 R2, proyección 2020-2300.

Año	Daño marginal del periodo (USD/tCO ₂)	Daños acumulados (USD/tCO ₂)
2020	0,2939186	0,2939186
2025	0,47441824	0,76833684
2030	0,73278768	1,50112452
2035	1,09113581	2,59226033

Año	Daño marginal del periodo (USD/tCO ₂)	Daños acumulados (USD/tCO ₂)
2040	1,57494047	4,1672008
2045	2,21299948	6,38020028
2050	3,03728407	9,41748435
2055	4,08270214	13,5001865
2060	5,3867824	18,8869689
2065	6,98929301	25,8762619
2070	8,93180909	34,808071
2075	11,2572435	46,0653145
2080	14,0093535	60,074668
2085	17,2322346	77,3069026
2090	20,9698082	98,2767108
2095	25,2653069	123,542018
2100	30,1607512	153,702769
2105	35,6472497	189,350019
2110	41,7523997	231,102418
2115	48,5011138	279,603532
2120	55,9153489	335,518881
2125	64,0138595	399,532741
2130	72,8119741	472,344715
2135	82,3213957	554,66611
2140	92,5500242	647,216135
2145	103,501802	750,717936
2150	115,176577	865,894513

Año	Daño marginal del periodo (USD/tCO ₂)	Daños acumulados (USD/tCO ₂)
2155	127,56999	993,464504
2160	140,673375	1134,13788
2165	154,473673	1288,61155
2170	168,953368	1457,56492
2175	184,090425	1641,65534
2180	199,85824	1841,51358
2185	216,225603	2057,73919
2190	233,156662	2290,89585
2195	250,610898	2541,50675
2200	268,543119	2810,04987
2205	286,903479	3096,95334
2210	305,637559	3402,5909
2215	324,686556	3727,27746
2220	343,987694	4071,26515
2225	363,475053	4434,74021
2230	383,081158	4817,82136
2235	402,740001	5220,56136
2240	422,392617	5642,95398
2245	441,133138	6084,08712
2250	459,342845	6543,42997
2255	477,136653	7020,56662
2260	494,593895	7515,16051
2265	511,76925	8026,92976

Año	Daño marginal del periodo (USD/tCO ₂)	Daños acumulados (USD/tCO ₂)
2270	528,700368	8555,63013
2275	545,41313	9101,04326
2280	561,92527	9662,96853
2285	578,248843	10241,2174
2290	594,391925	10835,6093
2295	610,359778	11445,9691
2300	626,155651	12072,1247

Fuente: Elaboración propia a partir del uso de la plataforma Mimi Framework.

Anexo III: Comparación PSC países con Benchmark

Tabla A.3. Precios Sociales del Carbono, experiencia internacional y rangos obtenidos del benchmark.

País	Año de Cálculo	Método de cálculo	PSC (USD 2021/tCO ₂ e)	PSC según el benchmark (USD 2021/tCO ₂ e)
Perú	2016	Costo Social del Carbono	7	12 - 27
Reino Unido	2021	Costo de mitigación para alcanzar objetivo de Política Pública	351	43 - 92
Reino Unido	2009	Costo de mitigación para alcanzar objetivo de Política Pública	100	42 - 92
Reino Unido	2007	Costo Social del Carbono	51	44 - 97
Francia	2019	Costo de mitigación para alcanzar objetivo de Política Pública	66	45 - 100
Francia	2008	Costo de mitigación para alcanzar objetivo de Política Pública	43	43 - 95
Estados Unidos	2021	Costo Social del Carbono	54	60 - 132
Estados Unidos	2013	Costo Social del Carbono	45	56 - 124
Estados Unidos	2010	Costo Social del Carbono	27	54 - 119
Alemania	2020	Costo Social del Carbono	238	51 - 113
Alemania	2019	Costo Social del Carbono	238	54 - 119
Alemania	2013	Costo Social del Carbono	124	50 - 110

País	Año de Cálculo	Método de cálculo	PSC (USD 2021/tCO ₂ e)	PSC según el benchmark (USD 2021/tCO ₂ e)
Noruega	2020	Costo de mitigación para alcanzar objetivo de Política Pública	59	63- 136
Noruega	2012	Costo de mitigación para alcanzar objetivo de Política Pública	30	62 - 136
Finlandia	2019	Costo Social del Carbono	94	49 - 107
Finlandia	2015	Costo Social del Carbono	51	45 - 99
Dinamarca	2021	Definición política basada en evidencia: Precio de mercado	29	62 - 137
Canadá	2016	Definición política basada en evidencia: CSC calculado por EEUU	38	47 - 54
Chile	2017	Costo de mitigación para alcanzar objetivo de Política Pública	30	24 - 54
Chile	2015	Definición política basada en evidencia: Precio de mercado	10	24 - 54
Chile	2013	Definición política basada en evidencia: Precio de mercado	5	24 - 53
Australia	2012	Costo Social del Carbono	49	46 - 102
Australia	2014	Costo de mitigación para alcanzar objetivo de Política Pública	40	47 - 104
Australia	2020	Costo de mitigación para alcanzar objetivo de Política Pública y Costo Social del Carbono	47	50 - 109
Países Bajos	2016	Costo de mitigación para alcanzar objetivo de Política Pública	63	54 - 118

País	Año de Cálculo	Método de cálculo	PSC (USD 2021/tCO ₂ e)	PSC según el benchmark (USD 2021/tCO ₂ e)
Países Bajos	2010	Costo de mitigación para alcanzar objetivo de Política Pública	111	54 - 114
Japón	2015	Costo Social del Carbono	30	40 - 89
Suecia	2020	Costo de mitigación para alcanzar objetivo de Política Pública	855	51 - 112
Suecia	2016	Costo de mitigación para alcanzar objetivo de Política Pública	143	51 - 113

Fuente: Elaboración propia.