NDC ACTION - COLOMBIA

FACILITANDO LA IMPLEMENTACIÓN DE UN DESARROLLO RESILIENTE AL CLIMA Y CON BAJAS EMISIONES DE CARBONO

Guía para la Priorización y Costeo de medidas de la NDC
Apoyo a Proceso de Actualización NDC 2025

18 de septiembre de 2024

Financiado por:

Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action

on the basis of a decision by the German Bundestag

IKI INTERNATIONAL CLIMATE INITIATIVE

Implementado por:

UN environment programme

NDC ACTION

Entidad Técnica Nacional:

FEDESARROLLO
Centro de Investigación Económica y Social

Asistencia técnica para la implementación del Proyecto NDC Action en Colombia (UNEP)

Fedesarrollo (Institución Técnica Nacional)

Entregable 4.2. Contribuciones al MADS en el proceso de la revisión NDC 2025: Guía para la Priorización y Costeo de medidas

Director del Proyecto:

Juan Benavides

18 de septiembre de 2024

Introducción

El proyecto NDC Action, impulsado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), en colaboración con el Centro Climático de Copenhague del PNUMA (UNEP CCC), tiene como objetivo facilitar la implementación de un desarrollo resiliente al clima y de bajas emisiones de carbono alineado con los objetivos nacionales y globales.

En Colombia, Fedesarrollo lidera el trabajo técnico de NDC Action como la Institución Técnica Nacional (NTI). En 2021 y 2022, Fedesarrollo desarrolló una Hoja de ruta que conecta recursos públicos y privados con los objetivos e iniciativas de las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC). En 2022 y 2023, segunda fase se priorizaron dos sectores para dar recomendaciones que fortalezcan instrumentos financieros: la eficiencia energética en el sector industrial y AFOLU (Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra).

El presente documento presenta un protocolo para que el MADS lidere la revisión NDC 2025. El protocolo articula contribuciones previas efectuadas por Fedesarrollo y añade consideraciones de gobernanza y estructuración financiera. El protocolo para la actualización está compuesto por los siguientes pasos: (i) papel del MADS y conformación de equipos para la revisión NDC 2025; (ii) precalificación y priorización; y (ii) remisión a estructuradores.

Capítulo 1. Papel del MADS y de los equipos para la revisión NDC 2025

1.1. Papel

En la revisión NDC 2020, el gobierno colombiano solicitó a los ministerios de línea el envío de propuestas de descarbonización de sus respectivos sectores. La construcción del portafolio de propuestas no estuvo precedida por diagnósticos que identificaran medidas de remoción de GEI en cada sector, o cuantificaran de manera homogénea los costos totales de propiedad (TCO por sus siglas en inglés) de las propuestas, ni de sus contribuciones a las metas sectoriales. Tampoco estuvo acompañado de propuestas de responsables o tiempos de ejecución.

En algunos casos, como transporte o energía por el lado de la demanda, existía un conocimiento más avanzado del tipo de soluciones, pero este conocimiento no era generalizado. No sorprendentemente, las propuestas que llegaron carecían de disciplina metodológica, eran desordenadas, tenían errores de inclusión (por ejemplo, con solicitudes de financiación de estudios costosos en asuntos ambientales generales, sin impacto en la descarbonización) y exclusión.

Propuesta para la priorización de medidas de la NDC e identificación de cartera de proyectos durante el proceso de actualización de la NDC 2025:

Para ordenar la producción de un *pipeline* de proyectos orientados al cumplimiento de los NDC, Fedesarrollo ha propuesto, en el desarrollo de fases anteriores de este proyecto, la creación de un trípode institucional de gobernanza para generar dirección, unidad de criterio y economías transversales en instrumentos de reducción de riesgo para movilizar financiación climática. No existen avances prácticos en este sentido, pero sí un mejor entendimiento por parte de los actores relevantes a la descarbonización de la economía, sobre prioridades, potenciales, taxonomía verde e instrumentos de financiación.

Como primer paso en la constitución de la gobernanza plena para la financiación climática, se propone un arreglo para la actualización NDC de la 2025 que tenga como líder al MADS, con los siguientes **6 roles**:

- **Convocatoria**. Por encargo de la Presidencia de la República, el MADS quedará facultado para (i) solicitar a cada Ministerio sectorial la lista de medidas y/o proyectos que conformarían la cartera de proyectos de acción climática de la NDC; (ii) guiar a los sectores en la construcción de sus propuestas, con una orientación de las intervenciones clave más esperadas en tipo y en tamaño, las que no pueden postularse, y un formato unificado de ficha de cada proyecto; (iii) priorizar las intervenciones y acordar responsabilidades de ejecución; (iv) enviar los prospectos a estructuración financiera al Grupo Bicentenario y (v) efectuar el monitoreo y seguimiento de las metas. Horizonte de tiempo propuesto: Primera semana de octubre de 2024.

- **Pedagogía y acompañamiento de construcción de carteras sectoriales**. El MADS y los Ministerios sectoriales nombrarán equipos técnicos a cargo de la conducción general del proceso (en el lado del MADS) y de la elaboración de propuestas de acción climática (en el caso de los Ministerios sectoriales).

El equipo de MADS realizará (i) un taller general de alineación de entendimiento y expectativas de metas de la NDC por sector; (ii) un taller general de aplicación de las metodologías de elegibilidad, adicionalidad, costeo y priorización de proyectos y (iii) una mesa de trabajo para revisar la aplicación de las metodologías y (iv) una discusión de avance con la construcción de las carteras en cada Ministerio. Horizonte de tiempo propuesto: Cuarta semana de noviembre de 2024.

- **Revisión de calidad y priorización de prospectos**. El equipo del MADS realizará un proceso de debida diligencia a las carteras de proyectos enviados por los Ministerios, confirmando la aplicación correcta de las metodologías de elegibilidad, adicionalidad, generación de valor y priorización de proyectos. Horizonte de tiempo propuesto: Segunda semana de diciembre de 2024.

- **Acuerdos de responsabilidades**. El equipo de MADS y los equipos acordarán las responsabilidades de inversión pública sectorial para los proyectos prioritarios. Horizonte de tiempo propuesto: Cuarta semana de enero de 2025.

- **Estructuración**. Los proyectos priorizados y que tengan co-financiación se remitirán al Grupo Bicentenario para estructuración financiera, previa instrucción por parte de la Presidencia de la República para que se construyan ventanillas especializadas de financiación climática y una facilidad de finanzas combinadas para mejorar el perfil de riesgo y ejercer un impacto catalítico de financiación. La Presidencia de la República, el MHCP y el MADS convocarán a mesas de trabajo con los delegados de gobierno a las juntas directivas de los bancos del Grupo Bicentenario para definir cupos para financiamiento climático público hasta 2030 y crear una reserva del 1% del CAPEX de los proyectos para estructuración de proyectos climáticos. Una vez validados los montos factibles de estos cupos, se presentarán para aprobación de las respectivas juntas directivas. Horizonte de tiempo propuesto: Primera semana de mayo de 2025

- **Monitoreo y seguimiento**. El equipo de MADS efectuará seguimiento semestral de avance y desempeño de los proyectos para recomendar acciones correctivas (cuando sean necesarias) y derivar lecciones útiles en el escalamiento de las iniciativas. Labor continua.

1.2. Equipos

Se propone conformar equipos técnicos sectoriales en el MADS, para acompañar la identificación y priorización de medidas de la NDC. Cada grupo tendrá un experto en taxonomía verde, un encargado de revisiones de elegibilidad, adicionalidad y priorización, y un experto en costeo y cálculo de reducción de emisiones.

Capítulo 2. Precalificación y priorización

Los proyectos son elegibles si están alineados con la Taxonomía Verde y son considerados una prioridad gubernamental.

La **elegibilidad** se determina a través de las siguientes preguntas:

> **ELE1**. ¿Se puede clasificar el proyecto en alguna de las categorías de la Taxonomía Verde? Si es sí ¿cuál es la categoría?
>
> **ELE2**. ¿Es prioritario el proyecto para el Gobierno nacional o los gobiernos locales? Si es sí ¿cómo se evidencia esta prioridad y el compromiso?

Si la respuesta a ELE1 **o** a ELE2 es no, el proyecto no es elegible para acelerar. En cualquier otro caso, el proyecto es elegible.

Los proyectos elegibles que están siendo estructurados actualmente por el gobierno o partes privadas no deben ingresar al proceso de aceleración porque duplican esfuerzos y no aportan adicionalidad.

La **adicionalidad** se determina a través de la siguiente pregunta:

> **ADI1**. ¿El proyecto está en estructuración? ¿Por cuenta de quién?

Si la respuesta a ADI1 es sí, el proyecto no debe proseguir en su aceleración por este canal, porque desplaza financiación que se haría de todas formas. Si la respuesta a A1 es no, el proyecto debe enviarse a estimación de costos de abatimiento.

Se deben preferir proyectos que añadan valor a las firmas o a la sociedad. El costo marginal de abatimiento (MAC) es el costo adicional de una intervención que reduce las emisiones de gases de efecto invernadero en una tonelada. Se calcula como la diferencia en los costos de inversión (CAPEX) y los costos operativos y de mantenimiento (costo total de propiedad, o TCO) entre la intervención y el estado actual, dividido por la diferencia en emisiones equivalentes de CO2 (eqCO2). Esta relación puede ser positiva o negativa, siendo un MAC negativo indicativo de oportunidades que reducen emisiones mientras generan una ganancia neta. Cuando un país, región o sector tiene alternativas para reducir las emisiones CO2eq, estas pueden ordenarse de menor a mayor costo, resultando en la curva del costo marginal de abatimiento (MACC). El Apéndice A muestra las definiciones básicas y ejercicios prácticos de construcción de cálculos de MAC y de curvas MACC.

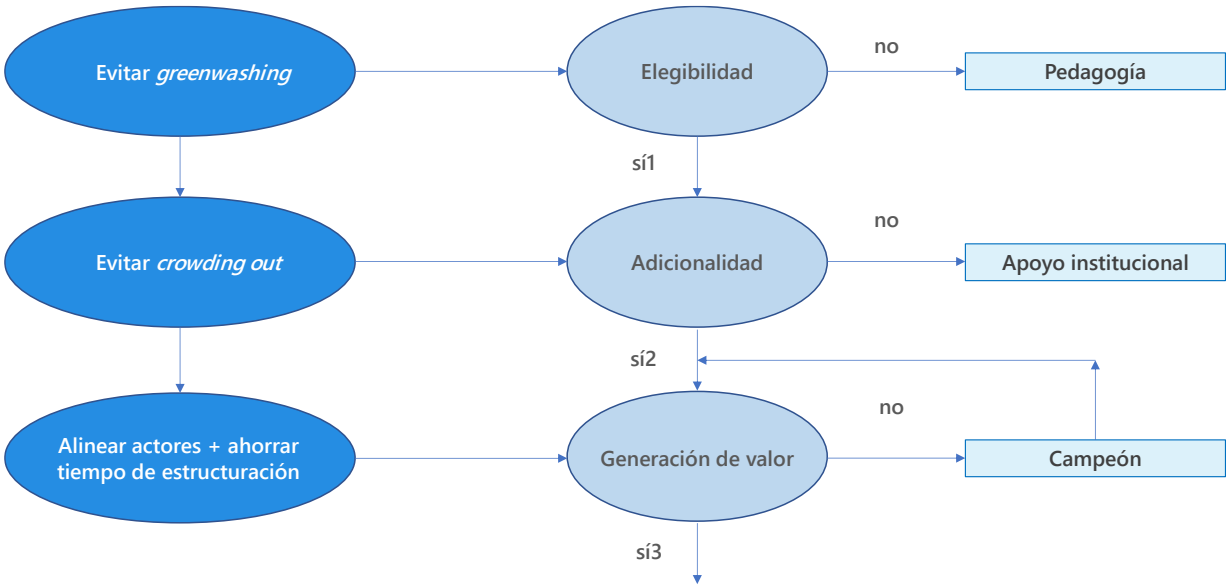
La **generación de valor** se evalúa a través de la siguiente pregunta:

> **GEV1**. ¿El proyecto tiene un MAC negativo o tiene un costo inferior al impuesto al carbón por tonelada de CO2eq removida)

Si la respuesta a GEV1 es sí, el proyecto puede pasar a priorización con vocación de ejecución ágil. Si la respuesta es no, el MADS creará una curva MACC de proyectos de alto costo para el país, pero que pueden ser de interés de financiación por actores extranjeros cuyo impuesto al carbono sea más alto que el colombiano.

Estos tres filtros conforman la Fase 1 (precalificación), y su lógica y flujo se presentan en la Gráfica 1.

Grafica 1. Fase 1: precalificación



Fuente: elaboración Fedesarrollo.

Los proyectos que añaden valor para el país o que pueden lograr financiación internacional se priorizan con base en criterios de velocidad de entrega y materialidad (contribución al logro de los compromisos NDC). Se deben preferir los proyectos que pueden comenzar operaciones dentro de 2 años y que pueden reducir los compromisos sectoriales de descarbonización en al menos un 0.25%. Por último, se pueden añadir criterios de equidad e inclusión. La equidad y la inclusión deben servir para impulsar iniciativas sólidas de acción climática, pero no pueden convertirse en el motivo principal para construir un *pipeline* de proyectos de la NDC.

Los proyectos de inversión se **priorizan** con tres criterios. *Para los proyectos que hayan pasado la precalificación*, en cada indicador presentado a continuación, como en la Fase 1, una respuesta SÍ recibe un 1, y una respuesta NO recibe un 0:

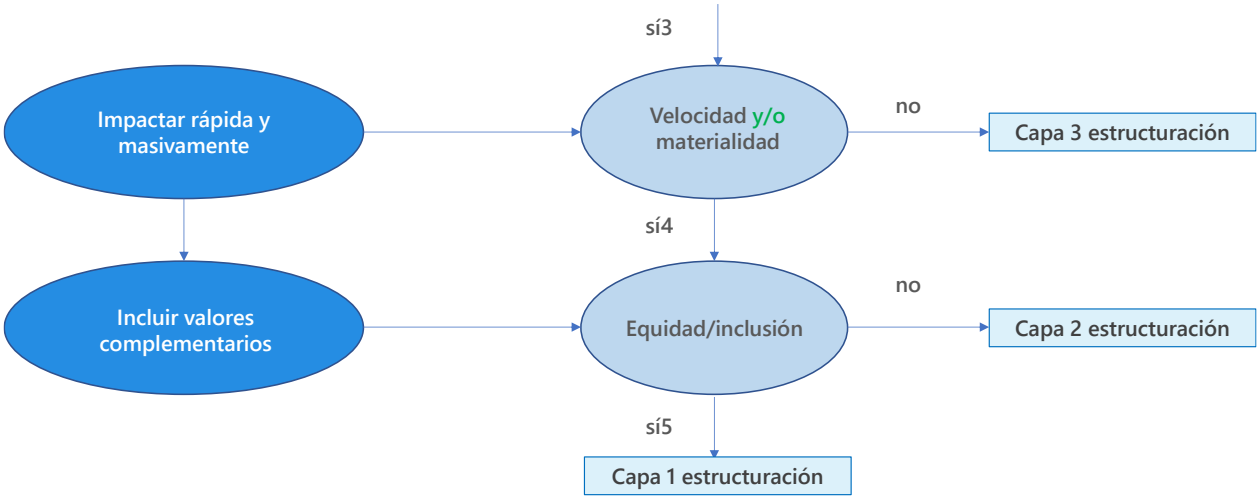
VELO1. ¿Puede el proyecto empezar a operar en menos de 2 años?

NDC1. ¿Aporta el proyecto una reducción de por lo menos el 0,25% de los compromisos sectoriales de descarbonización en la NDC?

EQI1 y **EQI2** (cada uno por separado). Se requiere elegir por parte del MADS hasta dos criterios de equidad e inclusión. por ejemplo, que el proyecto integra a las comunidades aledañas como participantes del proyecto, o que el proyecto se desarrolla en zonas PDET o ZOMAC, de forma que la respuesta sea sí o no.

La lógica y el flujo de la Fase 2 (priorización) se presenta en la Gráfica 2.

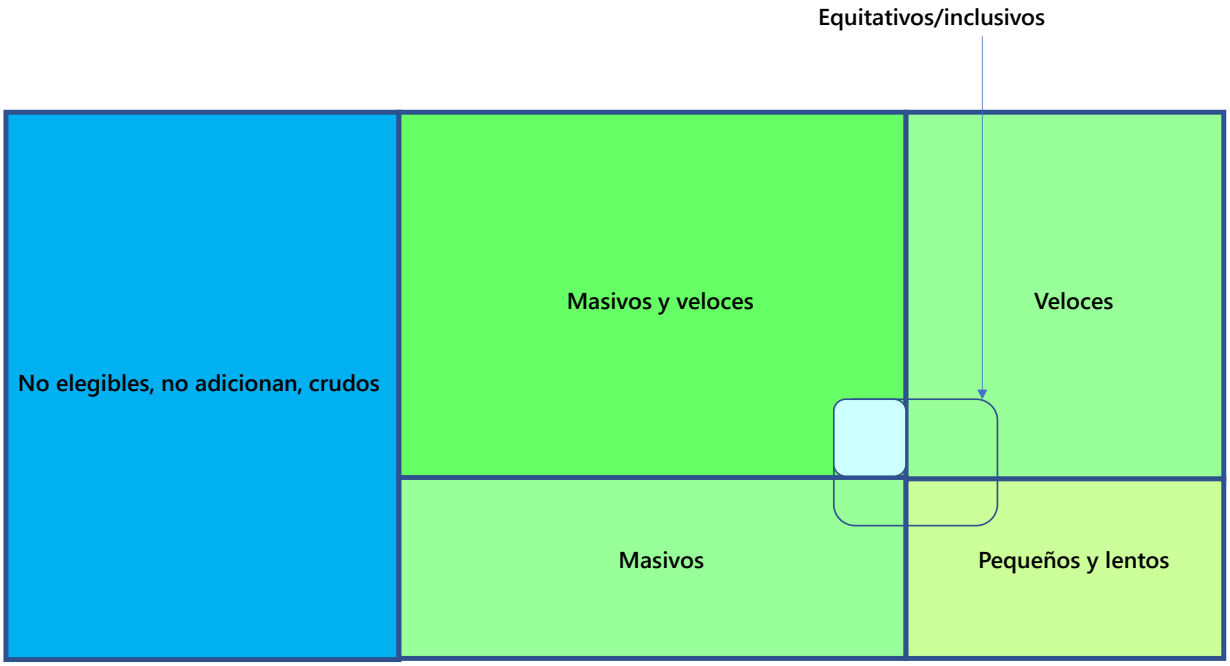
Gráfica 2. Fase 2: priorización



Fuente: elaboración Fedesarrollo.

La Gráfica 3 integra las dos fases, en azul, están los proyectos que entran a un proceso de aceleración, y en diferentes tonos de verde, están los proyectos de mayor preferencia.

Gráfica 3. Clasificación final de proyectos



Fuente: elaboración Fedesarrollo.

La Tabla 1 presenta la tabulación del modelo de priorización que se encuentra en el archivo de Excel adjunto. La priorización es de carácter ordinal e incluye también los proyectos que no pasaron la precalificación. La calificación puede tomar valores entre 0,00 y 5,00.

Tabla 1. Protocolo de priorización

VELOCIDAD DE ENTREGA	1 SÍ; 0 NO	
	Respuesta	Observaciones
VEL1	1	
APORTE A LAS METAS NDC	1 SÍ; 0 NO	
	Respuesta	Observaciones
NDC1	1	
BONIFICACIÓN POR EQUIDAD E INCLUSIÓN	1 SÍ; 0 NO	
	Respuesta	Observaciones
EQI1	1	
EQI2	0	

TABLA DE PUNTAJE		PUNTAJE DEL PROYECTO
NO ELEGIBLE (D7 = 0)	0,00	
ELEGIBLE, NO ADICIONA (D7 = 1; D16 = 1)	1,00	
ELEGIBLE, ADICIONA, NO ACELERA (D7 = 1; D16 = 0; D21 = 0)	2,00	
ACELERABLE (D21 = 1) CON D27 = D32 = 0	3,00	
ACELERABLE (D21 = 1) CON D27 = 0 Y D32 = 1	3,50	
ACELERABLE (D21 = 1) CON D27 = 1 Y D32 = 0	4,00	
ACELERABLE (D21 = 1) CON D27 = D32 = 1	4,50	
ACELERABLE + BONIFICACIÓN POR EQUIDAD E INCLUSIÓN	4,5 + 0,25*(D36+D37)	

Fuente: elaboración Fedesarrollo.

Capítulo 3. Remisión a estructuradores

La Presidencia de la República, el MHCP y el MADS convocarán a mesas de trabajo con los delegados de gobierno a las juntas directivas de los bancos del Grupo Bicentenario para definir cupos para financiamiento climático público hasta 2030 y crear una reserva del 1% del CAPEX de los proyectos para estructuración de proyectos climáticos. Una vez validados los montos factibles de estos cupos, se presentarán para aprobación de las respectivas juntas directivas.

Como resultado de estas mesas de trabajo, los bancos de desarrollo local estructurarán proyectos con apoyo de los equipos especializados, realizarán *road shows* para lograr el acercamiento entre oferta y demanda y otorgarán recursos y mejoras crediticias, de acuerdo con sus cupos. Para los proyectos que no están en la frontera comercial, el MADS buscará la cofinanciación de su I+D+i con el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, los Ministerios que conforman el Gabinete Presidencial Para la Acción Climática, e inversionistas de riesgo.

Cada equipo estructurador debe estar compuesto, por lo menos, por:

- Un experto en finanzas climáticas y taxonomía verde. Experiencia de 5 años en análisis financiero de proyectos climáticos y uso de recursos concesionales para el proyecto climático, y apoyo a la verificación de condiciones de taxonomía para cierre financiero en al menos un proyecto.
- Un experto en modelaje financiero. Experiencia de 5 años en desarrollar hojas de cálculo de financiación de proyectos (estructuración de flujo de caja, cálculo de indicadores financieros).
- Un experto en estructuración de proyectos. Experiencia de 5 años en modelo de remuneración, asignación y cuantificación de riesgos, composición de la financiación (deuda/patrimonio), perfiles de repago de deuda e introducción de mejoras crediticias.
- Un abogado experto en contratación. Experiencia de 5 años en asesoría en financiación de proyectos y al menos un proyecto en financiamiento climático.

Como recomendaciones generales, las estructuraciones deben (i) usar una matriz de riesgos que siga las mejores prácticas internacionales disponibles; (ii) asegurar aportes patrimoniales y mejoras del perfil de riesgo en contratos por *project finance* para atraer a los inversionistas institucionales; (iii) asignar contratos en competencia, consistentes con la reducción de costos, a la calidad del servicio y a la gestión de adversidades y (iv) diseñar mecanismos de ajuste dentro de los contratos y protocolos justificados de salida del operador, para asegurar la continuidad del servicio y minimizar el surgimiento y profundidad de litigios.

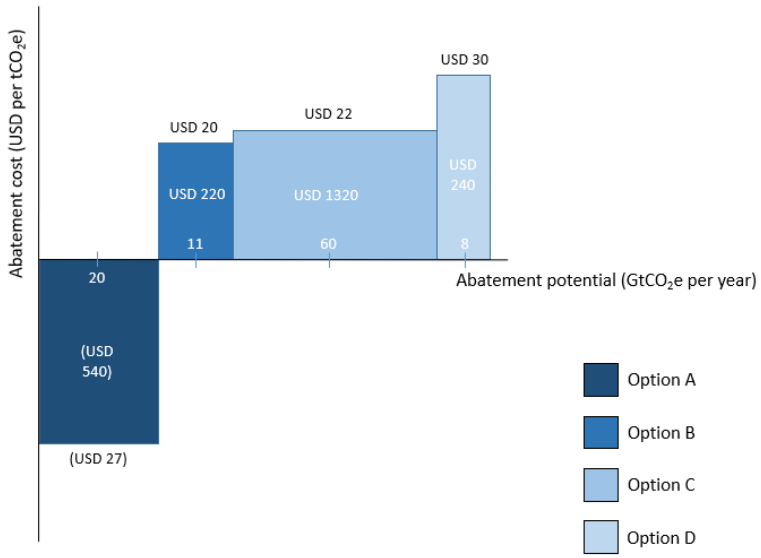
Apéndice A. Guía práctica para calcular MAC y curvas MACC

A1. ¿Qué es una curva MACC y cómo se puede usar?

El costo marginal de abatimiento es el costo adicional de una intervención que reduce las emisiones de gases de efecto invernadero en una tonelada. Es un cociente cuyo numerador es la diferencia de costos en inversión (CAPEX) más la diferencia en costos de operación y mantenimiento (costo total de propiedad; TCO por sus siglas en inglés) entre una intervención y el statu quo, y cuyo denominador es la diferencia en emisiones de eqCo2 entre las dos alternativas. Este cociente puede ser positivo o negativo. Los costos marginales de abatimiento negativos corresponden a oportunidades que reducen las emisiones con una ganancia económica neta.

Cuando un país, una región, o un sector económico tienen *n* alternativas para reducir las emisiones de eqCO2, cada una con su propio costo y potencial de abatimiento incrementales, estas se pueden ordenar de menor a mayor costo. La curva escalonada resultante se llama curva de costos marginales de abatimiento (MACC por sus siglas en inglés). Como se muestra en la Gráfica A1, la curva MACC es una colección de *n* rectángulos cuya altura corresponde al costo incremental y cuya base corresponde a la cantidad de eqCO2 evitada.

Gráfica A1. Ejemplo de una curva MACC



Fuente: CEEW- CEF (2024).

El área de cada rectángulo es la inversión *adicional* requerida para evitar la cantidad de emisiones de su base con respecto al status quo (que puede una alternativa sin inversiones). Los costos de abatimiento más bajos muestran las oportunidades más económicas para evitar emisiones. La curva MACC es una

herramienta de priorización que sirve para priorizar la financiación y el otorgamiento de apoyos para reducir las emisiones. En la Gráfica A1 se observa que:

- Las inversiones adicionales totales para las opciones A, B, C y D son USD **-540**, USD 220, USD 1320 y USD 240, respectivamente. El valor negativo de la opción A implica un ahorro en el presupuesto de descarbonización.
- Los costos marginales de abatimiento empiezan en USD **-27/ton eqCO2** para la opción A, y ascienden a USD 30/ton eqCO2 para la opción D.
- La alternativa con mayor potencial de abatimiento es la opción C, con un total de 60, pero tiene costos marginales de abatimiento de USD 22/ton eqCO2, lo que implica que un actor privado o un sector no invertiría en esta alternativa a menos que se le pagaran USD 1320.

Suponga que la curva MACC con las unidades ficticias de la Gráfica 1 corresponde a las opciones de descarbonización del sector de agricultura y forestal, y que el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Sostenible (MADR) tiene a su cargo la meta de reducir en 91 las emisiones del sector. La mejor alternativa de política pública consistiría en:

- Facilitar la inversión privada en la opción A para reducir las emisiones en 20, dado que tiene costos negativos de USD 540 (ganancias económicas).
- Invertir en la opción B, que reduce las emisiones en 11 e incurre en un costo neto de USD 220.
- Finalmente, invertir en la opción C, incurriendo en un costo neto de USD 1320 que reduce las emisiones en 60.
- El MADR debe invertir USD 1540 de presupuesto en abatimiento para reducir 71, y el sector privado puede, en principio reducir 20 sin subsidios públicos (salvo garantías para mejorar el perfil de riesgo de los proyectos con costo negativo).

Debe anotarse que la inversión total y la inversión marginal para abatimiento en un proyecto sólo coinciden cuando la alternativa de status quo no tiene inversión. Cuando el cálculo del costo marginal de abatimiento compara una tecnología más limpia que ´reta´ (*challenger*) a una tecnología que se ´defiende´ (*defender*), el costo marginal representa el ahorro o pago adicional sobre la tecnología que se defiende.

La inversión en acciones con costo financiero positivo, pero con amplios co-beneficios se debe implementar idealmente con un proceso de selección competitiva para que los desarrollen los empresarios que soliciten el menor subsidio público, y que tengan capacidades técnicas y financieras para completar exitosamente la inversión y operar satisfactoriamente el proyecto.

A2. Fórmulas básicas

El costo marginal de abatimiento (MAC) de una opción de mitigación se calcula de la siguiente manera:

$$MAC = \frac{\Delta TCO}{\Delta GEI} = \frac{TCO(\text{opción de mitigación}) - TCO(\text{línea base})}{GEI(\text{línea base}) - GEI(\text{opción de mitigación})}$$

$$TCO = CAPEX + \sum_{t=1}^{L}\left(\frac{OPEX(t)}{(1+r)^t}\right) - \frac{CAPEXR(t)}{(1+r)^L}$$

$$OPEXe(t) = pe(t) \cdot qe(t) + AOMe(t)$$

$$GEIe(t) = \sum_{t=1}^{L}[qe(t) \cdot \alpha(t)]$$

$$OPEXne(t) = \beta(t) \cdot Q(t) + AOMne(t)$$

$$GEIne(t) = \sum_{t=1}^{L}[Q(t) \cdot \gamma(t)]$$

Donde:

TCO es el costo total de la opción de mitigación o de la línea base.

$CAPEX$ es el costo de inversión (se asume por simplicidad que se efectúa enteramente en t = 0). Puede ser cero para la línea base, como se verá en algunos de los ejemplos.

$OPEXe(t)$ son los costos operacionales (de energía; y de administración, operación y mantenimiento) en el año t para proyectos de mitigación en energía.

$pe(t)$, $qe(t)$ y $AOMe(t)$ son el precio unitario de la energía, la cantidad de energía consumida, y los gastos de administración, operación y mantenimiento en el año t, respectivamente, para proyectos de mitigación en energía.

$GEIe(t)$ son las emisiones de GEI en el año t, que se calculan por la multiplicación del consumo de energía $qe(t)$ y las emisiones de GEI por unidad de consumo energético, $\alpha(t)$.

$OPEXne(t)$ son los costos operacionales variables y fijos de reducción de GEI en proyectos no energéticos (AFOLU, por ejemplo).

$\beta(t)$, $Q(t)$ y $AOMne(t)$ son el costo variable por unidad de intervención (km2, por ejemplo), el total de unidades de intervención (total de km2, por ejemplo) y los costos fijos de administración, operación y mantenimiento en el año t, respectivamente, para proyectos no energéticos. En ocasiones, los costos $AOMne(t)$ se pueden trasladar a un costo promedio por unidad de intervención.

$GEIne(t)$ son las emisiones de GEI en el año t, que se calculan por la multiplicación del total de unidades de intervención $Q(t)$ y las emisiones de GEI por unidad de intervención, $\gamma(t)$.

r es la tasa de descuento, que debe reflejar el riesgo de las inversionistas.

A3. Ejemplos numéricos

Ejemplo 1. Cambio de iluminación: con calculadora y simplificación sin descuento en el tiempo

Una empresa está evaluando el ahorro que se produciría por un cambio de 500 bombillas incandescentes por bombillas de tipo LED que ofrecen el mismo nivel de servicio (*lumens*). Los datos básicos son:

- El bombillo LED cuesta USD 2,30, tiene una vida útil promedio de 10000 horas, y consume 11 vatios.
- El bombillo incandescente cuesta USD 0,30, tiene una vida útil promedio de 1000 y consume 60 vatios.
- El costo de la electricidad es de USD 0,07/kWh y se genera totalmente con termoeléctricas con base a carbón. La ratio de emisiones para este tipo de generación es 0,85 kg eqCo2/kWh.

Las dos alternativas se deben comparar sobre el ciclo de vida del producto de más larga duración (10000 horas).

El TCO de un bombillo LED será:

$CAPEX$: USD 2,50.

Costo de la energía: (0,011 kW) x (10000 horas) x (USD 0,07/kWh) = USD 7,70.

TCO: USD 10,20.

El TCO de un bombillo incandescente será:

$CAPEX$: USD 3 (10 unidades para 10000 horas).

Costo de la energía: (0,06 kW) x (10000 horas) x (USD 0,07/kWh) = USD 42.

TCO = USD 3 + USD 42 = USD 45 (ignorando costos laborales y de compra).

Con estos valores, $\Delta TCO\ por\ bombillo\ reemplazado =$ USD -34,80 (negativo). Es buen negocio. El valor total es $\Delta TCO =$ (-34,80) X 500 **= USD -17.400.**

Los ahorros de energía son de (0,06 – 0,011 kW) X 10000 h = 490 kWh/bombillo reemplazado durante 10000 horas. El ahorro total de energía (500 bombillos) durante ese mismo período será de (490 kWh/bombillo) por 500 bombillos = 245.000 kWh.

El ahorro en CO2 es $\Delta GEI =$ 245.000 X 0,85 kg eqCO2/kWh X (1/1000 ton/kg) = **208,25 ton eqCO2** para 500 bombillas que funcionan 10000 horas (posiblemente están prendidos ¼ del tiempo). Finalmente, MAC = (-17.400) / (208,25) **= -83,55 USD /ton eqCO2**.

*

Ejemplo 2. Cambio de tecnología de bus de transporte masivo urbano: mini taller 1 con hoja de cálculo

Asuma que Colombia ha llegado al punto en el que toda la electricidad se genera con fuentes renovables, y que la ciudad de Bogotá desea introducir 180 buses eléctricos adicionales. Sin la intervención de las autoridades, estos 180 buses serían a diésel. Los datos básicos, que ya incorporan cálculos intermedios para algunos rubros, son:

- Ambos tipos de vehículo tienen una vida útil de 16 años. No hay valor de salvamento en ningún caso.
- Los flujos se traen a valor presente con un r = $WACC$ = 0,12.
- Ambos tipos de buses tienen una ocupación media de 60 pasajeros, recorren 300 km/día, y están en servicio el 92% del año.
- Las emisiones de un bus a diésel son de 49 gr/(pasajero-km).
- El $CAPEX$ de un bus eléctrico es de USD 535.897 (sin incluir infraestructura de carga, que se supone ya existe) y el $CAPEX$ de un bus a diésel es de USD 400.000.
- El $OPEX$ anual de un bus eléctrico (suma de compras de electricidad y otros AOM) es de USD 51.000, y el $OPEX$ anual de un bus a diésel (suma de compras de combustible y otros AOM) es de USD 68,000. Ambos para una distancia de 300 km diarios con un factor de uso del 92%.

- La tasa de descuento del proyecto es de *r* = 12%.

El TCO de cada tecnología se calcula construyendo una serie de 16 flujos anuales de inversiones + gastos operacionales, y luego usando la función VNA (o NPV en versión en inglés) de Excel.
La serie para 1 bus eléctrico es (586.897, 51.000, …, 51.000), y para un bus a diésel es (468.000, 68.000, …, 68.000), con el primer valor de ambas series en el año 0.
Con el uso de la función VNA, usted debe comprobar que:
El TCO de un bus eléctrico es USD 934.252 y el TCO de un bus a diésel es USD 931.139.
Con estos valores, el ΔTCO por bus = (934.252 – 931.139) = USD 3.113, y el valor total es ΔTCO = USD 3.113 X 180 buses = **USD 560.293**.

El ahorro de eqCO2 es igual al producto de las emisiones de bus a diésel por pasajero-km, la ocupación de pasajeros, los km diarios recorridos, los días del año, y el porcentaje de tiempo en servicio al año, dividido por 1 millón de gramos por tonelada. Nótese que las emisiones de los buses eléctricos son 0 en este caso, puesto que la generación eléctrica es totalmente renovable. Cuando hay una mezcla de generaciones, las emisiones deben reconocer la fracción producida por generación térmica.

Usted debe comprobar que la reducción de emisiones por bus es $\Delta GEI\ por\ bus$ = 296 ton eqCO2/año, que la reducción de emisiones por bus en 16 años = 4.379 ton eqCO2, y que la reducción total por la inversión en 180 buses es **852.986 ton eqCO2**. Finalmente, MAC = (560.293) / (4.379 ton eqCO2) = **127,95 USD /ton eqCO2.**

*

Ejemplo 3. Protección de un bosque existente: mini taller 2 con hoja de cálculo

Se desea proteger por 10 años una fracción del área de un bosque tropical bajo amenaza de deforestación, de acuerdo con las siguientes características:

- Área para proteger = 100.000 Ha.
- Inversión inicial ($CAPEX$) = USD 200.000.
- Costo anual de operación ($OPEX$) = USD 130.000/año a partir del año 1.
- El acervo de CO2 en el bosque es de 500 ton eqCO2/Ha.
- El proyecto evitará una reducción anual del área del bosque del 0.2% y el 90% del CO2 almacenado sería emitido en caso de que el proyecto no se adelante.
- La eficiencia del esfuerzo de protección es del 70%. Además, las emisiones mercadeables se pueden anualmente reducir un 20% por razones biológicas y climáticas, y otro 20% por ´fugas´ originadas en razones sociales.
- La tasa de descuento del proyecto es de *r* = 16%.

El TCO es el valor presente de la serie de 11 flujos anuales de inversiones + gastos operacionales. La inversión se realiza en el año 0. En este caso NO hay inversión en la línea base. La serie es (200.000, 130.000, …, 130.000).

Usted debe comprobar, con el uso de la función VNA, que TCO = **USD 428.320**.

En la línea base, se emitirían 100.000 Ha X 500 ton eqCO2/Ha X 0,2 X 90% de CO2 = 90.000 ton eqCO2. Debido a la intervención, $\Delta GEI\ por\ año$ = 90.000 X 0,7 por efecto eficiencia – (90.000 x 0,7) x 0,2 por razones climáticas – (90.000 x 0,7) x 0,2 por razones sociales = 63,000 – 12,600 – 12,600 = 37.800 ton eqCO2/ año. Esta diferencia corresponde a las emisiones que realmente se pueden esperar y monetizar por el proyecto. Las emisiones totales son ΔGEI = 37,300 ton eqCO2/ año x 10 años = **373.000 ton eqCO2**. El costo marginal de abatimiento es MAC = (428.320 / 373.000) = **USD 1,15 / ton eqCO2**.

A4. Revisión del modelo GACMO de UNEP (PNUMA): mini taller 3 de cálculo de una curva MACC para 2030 en eficiencia energética industrial

GACMO (Modelo de Costos de Reducción de Gases de Efecto Invernadero) es una herramienta de proyección de las emisiones de gases de efecto invernadero desarrollada por el Centro Climático de Copenhague del PNUMA. GACMO puede apoyar la preparación y actualización de las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC, por sus siglas en inglés) de los países, los sectores o las regiones de un país.

La versión de GACMO accesible en el link de la referencia UNEP (2024) al final de este documento incluye 7 hojas de cálculo con datos técnicos que el usuario debe considerar siguiendo un enfoque paso a paso. La interfaz de la herramienta está diseñada de tal manera con un orden lógico desde la primera hoja de cálculo. Los cálculos y la generación de gráficos se realizan de forma automatizada. Esto significa que el usuario, que cuenta con los datos necesarios para utilizar la herramienta GACMO, no necesita estar familiarizado con los cálculos, sino solo con cómo ingresar los datos y cómo interpretar los resultados. La herramienta. GACMO incluye una serie de valores predeterminados y precargados en la herramienta y que el usuario no tiene que actualizar, a menos que cuente con mejores datos de entrada y desee realizar estimaciones más precisas. Todos estos valores predeterminados son visibles y accesibles para el usuario.

Los datos para utilizar GACMO son el consumo energético sectorial de combustibles fósiles y electricidad de un país y las emisiones de gases de efecto invernadero de los otros sectores no energéticos para un año de inicio. A partir de estos datos, GACMO estima las emisiones de CO2 por combustión de combustibles y presenta las emisiones de GEI para el año de inicio. Luego, aplicando factores de crecimiento para cada sector (específicos para el país y que se introducen en la herramienta por el usuario), GACMO estima las emisiones de GEI en un escenario de referencia (BAU), con cálculos para los años 2025, 2030, 2035 y/o 2050.

GACMO dispone de 119 opciones de mitigación organizadas en 24 categorías de actividades, tales como agricultura, energía de biomasa, eficiencia energética en viviendas, silvicultura, así como energía geotérmica, hidroeléctrica, solar y eólica, entre otras. Algunas opciones de mitigación incluidas en la herramienta GACMO requieren el uso de combustibles fósiles (por ejemplo, mejora de la eficiencia energética, plantas de generación de electricidad con gas natural).
Las 7 hojas de cálculo de GACMO son:

- Supuestos: incluye datos básicos del país, precios de combustible y datos técnicos. Esta hoja debe completarse por el usuario.
- Balance energético: incluye los datos energéticos por sector de actividad para el año de inicio. Esta hoja debe completarse por el usuario.
- Balance de GEI: incluye los datos de emisiones de GEI por sector de actividad para el año de inicio. Las emisiones de CO2 por combustión de combustibles se estiman automáticamente. Las emisiones de CH4 y N2O por combustión de combustibles y las emisiones de los sectores no energéticos deben completarse por el usuario.
- Crecimiento: incluye el crecimiento esperado en el consumo de energía para los diferentes sectores de actividad en diferentes períodos de tiempo. Esta hoja debe completarse por el usuario.
- Balances energéticos proyectados BAU: incluye los balances energéticos futuros para los años 2025, 2030, 2035 y 2050. Los datos en esta hoja son calculados automáticamente.
- Balances de GEI proyectados BAU: incluye las emisiones futuras de GEI para los años 2025, 2030, 2035 y 2050. Los datos en esta hoja son calculados automáticamente.
- Opciones de mitigación: incluye las opciones de mitigación que el usuario puede seleccionar dependiendo del contexto nacional, así como los datos relativos a esas opciones de mitigación que se necesitan como entradas para los cálculos. Esta hoja debe ser completada por el usuario. Esta hoja de cálculo incluye datos sobre el potencial de reducción de emisiones de las opciones de mitigación, así como datos sobre sus costos, que son calculados automáticamente por la herramienta.

Adicionalmente, GACMO incluye dos hojas de cálculo adicionales:

- Resultados: incluye los resultados finales de las proyecciones de emisiones de GEI, cálculos de reducciones y costos. La hoja también muestra los resultados gráficos del análisis de datos.
- Seguimiento del progreso: esta hoja de cálculo sirve para monitorear el avance realizado en la implementación de cada acción de mitigación.

El taller consiste en construir la curva MACC de eficiencia energética en la industria con las intervenciones estudiadas y valores asumidos por GACMO (que no necesariamente coinciden con los de Colombia), sus costos fiscales, y las contribuciones a la reducción de GEI a 2030. Para ello:

- Descargue el archivo ´gacmo-version-206´ de la página: https://unepccc.org/wp-content/uploads/2024/02/gacmo-guidance-en-for-new-version-2.pdf
- Vaya a la pestaña ´Mitigation options´ (paso 7) para el año 2030.
- Para cada una de las 3 tecnologías (filas 188 a 190), calcule los MAC individuales, usando la información de las columnas D y F.
- Defina la profundidad de cada tecnología (número de unidades que se financiarían) y construya la curva MACC sectorial.
- Calcule el presupuesto incremental privado (intervenciones con MAC negativo) y el presupuesto incremental público (intervenciones con MAC positivo) de la curva sectorial. Calcule el total de la contribución a la reducción de GEI en 2030 por el sector. Estos resultados, por supuesto, no corresponden a la realidad colombiana. Para obtener resultados adecuados al contexto, el equipo de MADS debe insertar la información solicitada en las hojas de cálculo anteriores.

A5. Lecturas adicionales

Documento	Behrentz E, Cadena A., Delgado R., Espinosa M., Hernández M., Londoño M., Marquez J.C., Ovalle K., Rosales R., Corredor A., de la Ossa M., Henao L., Joya S., Montoya L.C., Peña C., Pérez J.F., Prada A., Ortiz E., Rojas A.M., Saavedra L.V. y Zambrano M. (2014). *Productos Analíticos para apoyar la toma de decisiones sobre acciones de mitigación a nivel sectorial: Curvas de Abatimiento para Colombia. Documento General (Resumen Ejecutivo)*. Universidad de los Andes. Preparado para: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Bogotá, Colombia. https://archivo.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/estudios_de_costos_de_abatimiento/general/General.pdf
Resumen	Se presenta un análisis exhaustivo de las emisiones de gases de efecto invernadero en Colombia en cuatro sectores: agropecuario, residuos, energético y transporte, proponiendo opciones de mitigación y evaluando su costo-efectividad. El estudio, basado en talleres con expertos, incluye una actualización de la línea base de emisiones nacionales y la construcción de curvas de abatimiento sectoriales.
Utilidad para Colombia	Este documento fue la base de la primera versión de la contribución determinada a nivel nacional de Colombia ante la CMNUCC del año 2015. El documento ilustra la construcción y uso de las curvas de costos marginales de abatimiento sectoriales para cuantificar el potencial de reducción de emisiones sectoriales y establecer escenarios de mitigación. El documento proporciona una lista extensa de medidas de mitigación evaluadas en cada sector.

Documento	Jones, J., and J.K. O'Hara (Eds), 2023. *Marginal Abatement Cost Curves for Greenhouse Gas Mitigation on U.S. Farms and Ranches*. Office of the Chief Economist, U.S. Department of Agriculture, Washington, DC. https://www.usda.gov/sites/default/files/documents/Marginal-Abatement-Cost-Curve-Estimate-Methodology-Report.pdf
Resumen	Se presenta una metodología para estimar los costos de mitigación de gases de efecto invernadero (GEI) en las granjas y ranchos de EE.UU. Se enfoca en tecnologías y prácticas agrícolas inteligentes frente al clima, como biochar, alternancia de riego en arrozales, cultivos de cobertura, estrategias de manejo de alimentación, fertilizantes de eficiencia mejorada y pastoreo prescrito. El informe actualiza datos de estudios anteriores y describe cómo desarrollar curvas de costo de abatimiento marginal, incluyendo análisis de sensibilidad y limitaciones de las curvas.
Utilidad para Colombia	Por el peso de las emisiones provenientes de la ganadería bovina en Colombia, este documento es de utilidad para ilustrar cómo se identifican y evalúan medidas de mitigación (tecnologías) a nivel de finca en el sector agropecuario y se agregan para

	evaluar el potencial de mitigación nacional. Incluye fichas que estandarizan la información necesaria para evaluar y comparar las tecnologías.

Documento	McKinsey&Company (2009). Pathways to a Low Carbon Economy for Brazil. McKinsey&Company. Sao Paulo. Brazil. https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/pathways-to-a-low-carbon-economy-for-brazil
Resumen	Se identifican y cuantifican las oportunidades de mitigación de gases de efecto invernadero (GEI) y sus costos para Brasil. Señala que Brasil tiene un papel importante en la reducción de emisiones globales, destacando la reducción de la deforestación y las emisiones del sector agrícola como las principales fuentes de abatimiento. El estudio propone más de 120 iniciativas para reducir las emisiones proyectadas a 2030 en un 70% a un costo menor de 60 euros por tonelada de CO2e. También se exploran desafíos y costos asociados con la implementación de estas iniciativas, especialmente en la Amazonía.
Utilidad para Colombia	Brasil tiene un perfil de emisiones de gases efecto invernadero similar al de Colombia debido a sus altas emisiones por deforestación y ganadería y sus bajas emisiones energéticas por su matriz de generación de energía eléctrica con alta participación hidroeléctrica. El documento ilustra cómo generar y utilizar las curvas MAC para comparar el costo y la efectividad de diferentes medidas de mitigación a nivel nacional integrando el sector AFOLU al resto de sectores.

Documento	Farbes, J., Haley, B. y Jones, R. (2021). *Marginal Abatement Cost Curves for U.S. Net-Zero Energy Systems: A Systems Approach.* Evolved Energy Research. Preparado para: Environmental Defense Fund. https://www.edf.org/sites/default/files/documents/MACC_2.0%20report_Evolved_EDF.pdf
Resumen	Se propone una nueva metodología para calcular curvas MAC que estiman mejor los costos y rendimientos de las medidas de mitigación. Estas curvas MAC más sofisticadas se estimaron para el sistema energético de Estados Unidos entre 2021 y 2050, reflejando los costos marginales de mitigación crecientes. Las ventajas sobre las curvas MAC tradicionales son: 1) se capturan interacciones críticas entre medidas y sectores, 2) el uso de una metodología a nivel de sistemas da nociones sobre los costos diferenciales de implementar una misma medida bajo diferentes contextos, y 3) el portafolio de medidas pertinentes sólo incluye las que se vuelvan costo-efectivas cuando ya exista un despliegue significativo de otras medidas.
Utilidad para Colombia	La implementación de esta aproximación innovadora de las curvas MAC tiene el potencial de ayudarle a los decisores de política pública de Colombia a organizar sus

	prioridades y coordinarse con sectores estratégicos con una perspectiva temporal amplia.

Documento	Kesicki, F. y Strachan, N. (2011). *Marginal Abatement Cost (MAC) Curves: Confronting theory and practice.* Environmental Science & Policy, Volume 14, Issue 8, December 2011, p. 1195-1204. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1462901111001377
Resumen	Se discuten las limitaciones de las curvas MAC y la dependencia de las mismas por las autoridades de política climática, que puede sesgar la toma de decisiones y elegir medidas de mitigación ineficientes. Resalta cómo este instrumento debe complementarse con estudios y aproximaciones que incluyen el uso de una aproximación a nivel de sistemas para capturar interacciones, la consideración de beneficios secundarios, el modelaje de la incertidumbre y la representación de la reducción acumulativa de emisiones para abordar interacciones Inter temporales.
Utilidad para Colombia	Dada la novedad de las políticas climáticas y la ambición de las metas que se planteó el país en materia ambiental, los instrumentos utilizados para guiar la toma de decisiones deben reducir los sesgos. Las curvas MAC deben convertirse en un módulo dentro de un modelo más amplio que refleje interacciones y una perspectiva intertemporal.

Documento	Duffy, C., Apdini, T., Styles, D., Gibbons, J., Peguero, F., Arndt, C., Mazzetto, A., Vega, A., Chavarro-Lobo, J. A., Brook, R. y Chadwick, D. (2021). *Marginal Abatement Cost Curves for Latin American Dairy Production: A Costa Rica case study.* Journal of Cleaner Production, Volume 311, 15 August 2021, 127556. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652621017741
Resumen	El estudio utiliza datos de la industria de lácteos costarricense para realizar una Evaluación del Ciclo de Vida desde la cuna hasta la puerta de la granja y la primera curva MAC para la producción láctea en Latinoamérica. Se encontró que la eficiencia de medidas específicas de mitigación depende del tipo de granja, pero hay una serie de tecnologías beneficiosas tanto para la calidad del producto y la productividad de las fincas, como para la reducción de emisiones. Entre estas están la sinergia entre medidas de pastoreo y prácticas silvopastoriles, y la transición hacia el uso de alimentos de alta calidad para el ganado. A pesar de que hay evidencia que sugiere que lograr carbono-neutralidad a nivel de finca no es posible para muchos productores (a menos de que se trate de explotaciones extensivas), sí se necesitan recomendaciones de mitigación a menor escala que puedan ser adoptadas por cada productor.

Utilidad para Colombia	La ganadería es uno de los sectores más importantes dentro de la producción agropecuaria de Colombia, y la ganadería extensiva tiene una alta participación dentro de la ganadería total. Por esto, dedicar esfuerzos hacia la estimación de curvas MAC para guiar la implementación de estrategias hacia lograr carbono-neutralidad en este sector puede dar resultados muy positivos en cuanto a la consecución de las metas ambientales del país.

Referencias

CEEW-CWF (2024). Marginal Abatement Cost Curve (MACC). https://www.ceew.in/cef/quick-reads/explains/marginal-abatement-cost-curve

UNEP. (2024). Greenhouse gas Abatement Cost Model (GACMO). https://unepccc.org/gacmo-tool/