

Reporte

**Deep Decarbonization
Latin America Project
-Argentina -**

Junio 2021

Dossier de oportunidades de mitigación y su priorización

Actividad II AR 2

Priorización de medidas y análisis preliminar de factibilidad – Versión revisada

Índice

I.	Introducción	8
1.	El proyecto	8
2.	Objetivos de este reporte	9
II.	Procedimiento de análisis	10
III.	Opciones de mitigación	11
1.	Introducción.....	11
2.	Energía y transporte.....	11
3.	AFOLU	16
IV.	Enfoque metodológico para la priorización	21
V.	Resultados de la priorización	23
VI.	Evaluación preliminar de factibilidad	30
VII.	Anexos	62
VIII.	Referencias	132

Índice de tablas y figuras

Figura 1: Conjuntos de opciones de mitigación – Energía y Transporte	13
Figura 2: Conjuntos de opciones de mitigación - AFOLU	18
Figura 3: Inversiones en el upstream hidrocarburífero y en nueva capacidad de generación eléctrica	42
Figura 4: Principales regiones de Bosques Nativos en Argentina.....	52
Figura 5: Contraste entre la suma de los resultados de los modelos individuales y los datos históricos de consumo final de energía y la distribución de los errores	66
Figura 6: Energía eléctrica, combustibles gaseosos y resto de fuentes en el consumo final por subsector, 1960-2019	67
Figura 7: Esquema descriptivo de la metodología utilizada para la construcción de escenarios	71
Figura 8: Esquema descriptivo de la metodología utilizada para la construcción de escenarios de transporte liviano.....	75
Figura 9: Síntesis de la oferta y demanda agregadas de energía en Argentina	76
Figura 10: Generación de energía a partir de fuentes renovables, excluyendo gran hidroelectricidad	80
Figura 11: Potencia instalada por tecnología, año 2020	80
Figura 12: Generación eléctrica por fuente, año 2020	81
Figura 13: Proyección de área cultivada y producción para los principales cultivos agrícolas, sin incluir caña de azúcar	91
Figura 14: Regiones RETAA de la Bolsa Cereales y localización de las zonas evaluadas	92
Figura 15: Emisiones totales por residuos de cosecha, fertilizantes y carbono del suelo según rotaciones	93
Figura 16: Emisiones acumuladas, provenientes de cambios en el stock de carbono en el suelo (0-30 cm) según rotación - Gral. Villegas	96
Figura 17: Emisiones acumuladas, provenientes de cambios en el stock de carbono en el suelo (0-30 cm) según rotación- Tandil.....	96
Figura 18: Emisiones acumuladas, provenientes de cambios en el stock de carbono en el suelo (0-30 cm) según rotación- R. de la Frontera	97
Figura 19: Escenarios de secuestro de carbono – Biochar – MtCO ₂ e/año	102
Figura 20: Reducción acumulada de emisiones por uso de fertilizantes nitrogenados, para dos escenarios de adopción creciente de Urea con inhibidores de la volatilización (Urea-NBPT)	104
Figura 21: Reducción en la intensidad de emisiones por tonelada de grano (kg CO ₂ e/tn grano) para cereales y soja con niveles crecientes de adopción de tecnologías PGPR al 2050	105
Figura 22: : Indicadores ganaderos. Stock total (a), stock de vientres (b) y stock de invernada (c)	106
Figura 23: Relaciones ternero/vaca (a) y producción total (b).....	107
Figura 24: Total de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero según escenarios – Mt CO ₂ e	108
Figura 25: Intensidad de emisiones de GEI – kg CO ₂ e/kg eq Rch	108

Figura 26: Perfil de emisiones de GEI - MtCO₂e	109
Figura 27: Principales regiones de Bosques Nativos en Argentina	111
Figura 28: Superficie de bosques cultivados en Argentina - hectáreas	112
Figura 29: Caracterización de la superficie de bosques cultivados en Argentina	112
Figura 30: Captura neta de CO₂ de la categoría Bosques implantados en los 3 escenarios	114
Figura 31: Emisiones sector AFOLU - sin bosques implantados (serie histórica al 2016)	116
Figura 32: Evolución de la captura neta anual de CO₂ según tasas de incremento del área forestada	118
Figura 33: Emisiones netas de la agricultura, la ganadería y el bosques cultivados y uso de la tierra	118
Figura 34: Emision neta del sector AFOLU al 2050 por escenario de carbono neutralidad	119
Figura 35: Ganancias en volumen de los diferentes huertos semilleros clonales (HSC 1G, HSC 1.5G y HSC 2G) y familias de Cruzamientos Controlados (Flia CC) de P. taeda	121
Figura 36: Proyección de captura neta de CO₂ de la categoría Bosques implantados en los 3 escenarios considerando los stocks estimados de PMR	127

Tabla 1: Escalas por criterio de evaluación	22
Tabla 2: Matriz de priorización.....	24
Tabla 3: Síntesis de configuración de escenarios para Argentina y su grado de detalle abordado en esta instancia de evaluación	31
Tabla 4: Síntesis de resultados clave de la modelización del estado final del consumo final de energía y generación eléctrica para los tres escenarios de crecimiento del PIB.....	35
Tabla 5: Síntesis de resultados clave de la modelización del estado final del sistema de vehículos livianos para los tres escenarios de crecimiento del PIB.....	38
Tabla 6: Tasas de crecimiento por especie y provincia	45
Tabla 7: Factores de conversión y expansión por especie y provincia.....	46
Tabla 8: Captura de carbono a partir de implementación de medidas de cultivos agrícolas.....	49
Tabla 9: Potencial de reducción en la intensidad de emisiones (emisiones por unidad de producto) para cultivos agrícolas por uso de PGPR y mejoras en la productividad en sistemas ganaderos.....	51
Tabla 10: Captura de carbono a partir de implementación de medidas de cultivos agrícolas	55
Tabla 11: Potenciales de mitigación estimados para el sector AFOLU para el período 2020-2050	55
Tabla 12: Síntesis de supuestos de población y evolución del PIB.....	63
Tabla 13: Coeficientes estimados para los modelos econométricos de consumos energéticos sectoriales	65
Tabla 14: Estados inicial, de transición y final para la penetración de la energía eléctrica	68
Tabla 15: Distribución horaria de la demanda de energía eléctrica por sector para el año 2050	69
Tabla 16: Coeficientes estimados para el modelo econométrico del parque vehicular	72
Tabla 17: Participación por sector de consumo en el uso final total por fuente de energía, 2019.....	77
Tabla 18: Participación por fuente de energía en los consumos finales sectoriales, 2019	78
Tabla 19: Principales combustibles utilizados en transporte y participación sobre consumo final	79
Tabla 20: Variables relacionadas a los Datos de Actividad de Cultivos agrícolas - Año 2016.....	90
Tabla 21: Rindes utilizados para las estimaciones de emisiones en localidades de cinco regiones del país	92
Tabla 22: Rotaciones de cultivos evaluadas	92
Tabla 23: Emisiones estimadas por rotación para la localidad de Gral. Villegas – Buenos Aires.....	94
Tabla 24: Emisiones estimadas por rotación para la localidad de Tandil – Buenos Aires.....	94
Tabla 25: Emisiones estimadas por rotación para la localidad de Pergamino – Buenos Aires	94
Tabla 26: Emisiones estimadas por rotación para la localidad de Bandera – Santiago del Estero	95
Tabla 27: Emisiones estimadas por rotación para la localidad de Rosario de la Frontera – Salta.....	95
Tabla 28: Incrementos de rendimiento y producción de forraje por períodos al 2050	98
Tabla 29: Incrementos por períodos de la producción de biomasa proyectada	98
Tabla 30: Participación por tipo de cultivo – Año 2018	99
Tabla 31 Tasas de crecimiento por especie y provincia	116
Tabla 32 Factores de conversión y expansión por especie y provincia - Fuente BUR3	117
Tabla 33: Crecimiento de los nuevos clones y turnos de corta por calidad de sitio	123
Tabla 34: Cuadro 12.1 de la directriz IPCC 2006 - Variables utilizadas para el cálculo de PMR.....	125
Tabla 35: Estimación de las emisiones por cambios en la biomasa forestal considerando capturas en productores de madera recolectada (PMR) para el período 2010-2014	126

Tabla 36: Estimación del potencial de Mitigación al 2050, considerando un alto incremento en el area de bosques implantados (periodo 2020-2050)	128
Tabla 37: Estimación del potencial de Mitigación de las medidas necesarias para alcanzar carbono neutralidad al2050, considerando un alto incremento en el área de bosques implantados (periodo 2020-2050)	128
Tabla 38: Potencial de reducción en la intensidad de emisiones (emisiones por unidad de producto) para cultivos agrícolas por uso de PGPR y mejoras en la productividad en sistemas ganaderos.....	129

I. Introducción

El objetivo general de este reporte es presentar el enfoque metodológico para la priorización de opciones de mitigación y su aplicación de acuerdo a los conjuntos de opciones sectoriales presentado en el reporte de Instrumentos, políticas y medidas¹, para luego efectuar un análisis de factibilidad técnico-económica preliminar.

El propósito de esta actividad es hacer aportes en el procedimiento para identificar las medidas en las que se deben focalizar los esfuerzos futuros de manera de identificar un portafolio de inversiones y desarrollar un plan de inversión sectorial con capacidad de mitigación, potencial transformacional y factibilidad de implementación.

El documento se organiza de la siguiente manera. Tras describir brevemente el Proyecto regional y sus objetivos, junto con los elementos propios de la actividad actual, que es precisamente el objeto de este informe, se presenta el enfoque metodológico para proceder a la priorización de las medidas que permitirá identificar aquellas en las que se realizará el análisis de factibilidad.

1. El proyecto

El proyecto pretende contribuir a crear las condiciones necesarias para que los flujos de financiación sean consistentes con las necesidades relacionadas con senderos bajos en carbono y resilientes que deben adoptar los tres países latinoamericanos objetivo: Argentina, Brasil y Perú.

Más concretamente, en Argentina los principales objetivos del proyecto regional se interpretan a nivel nacional como los siguientes

1. Identificar las condiciones habilitantes para viabilizar la descarbonización de la economía del país y el fortalecimiento de la resiliencia. Para ello es conveniente mejorar y ampliar el acceso a la financiación climática internacional, así como potenciar las condiciones para lograr y ampliar el flujo de recursos privados que contribuyan a financiar la acción climática a largo plazo, con el fin de complementar lo que podrían ser unos recursos relativamente escasos del sector público, en un contexto definido, inicialmente, por la necesidad de financiar planes de recuperación altamente intensivos en financiación.
2. Proporcionar información sólida sobre la naturaleza y el alcance del desafío que plantea el cambio climático para crear conciencia y demostrar que la acción climática debe ser un elemento clave para permitir la recuperación económica a corto plazo, evitando al mismo tiempo las inversiones a largo plazo inadecuadas y fortaleciendo el desarrollo sostenible.

¹ Correspondiente a la Actividad I AR 2 y Actividad I AR 3

3. Contribuir a aportar elementos que mejoren y refuercen el actual marco de gobernanza, política y regulación climáticos, pilares de una acción climática sostenible a largo plazo bien concebida, eficaz y justa.
4. Identificación de instrumentos financieros nuevos e innovadores, a nivel de toda la economía y que sean apropiados a nivel sectorial, incluyendo aquellos capaces de colaborar en modificar favorablemente el perfil de riesgo-rendimiento de las inversiones.
5. Identificar oportunidades estratégicas de inversión en los sectores seleccionados, que puedan estar aún sometidos a importantes restricciones presupuestarias y financieras.
6. Evitar el potencial lock-in de carbono y reforzar las acciones de mitigación, aumentando al mismo tiempo la eficiencia de las decisiones de inversión.
7. Consolidar una cartera de inversiones verdes y sostenibles en un sector prioritario, al tiempo que se ayuda a explorar y proponer enfoques políticos del lado de la demanda para reducir las emisiones de GEI con una intensidad de inversión relativamente baja.
8. Demostrar que una recuperación verde es factible, atractiva desde la perspectiva del inversor y que contribuye a los modelos de desarrollo sostenible.

2. Objetivos de este reporte

Este informe hace parte del "*Dossier of new opportunities and relevant Policy insights*"² que comprende las actividades de revisión de acciones de mitigación incluidas en la NDC de Argentina y los planes sectoriales³, así como la identificación de nuevas medidas de mitigación identificadas durante el estudio⁴

Esas medidas (existentes y nuevas identificadas en este Proyecto) se presentan de manera compendiada en el documento "Análisis de instrumentos, políticas y medidas"⁵, con el objeto de proceder a priorizarlas mediante un enfoque metodológico desarrollado a los fines de este estudio. Luego, se efectúa un análisis preliminar de factibilidad de las medidas priorizadas que se presenta y analiza en este documento.

Finalmente, se espera que los resultados del presente reporte sirvan de insumo para la elaboración de un portafolio de inversiones para luego desarrollar un plan de inversión sectorial⁶.

² Correspondiente al Milestone II AR 1

³ Correspondiente a la Actividad II AR 1

⁴ La identificación de nuevas medidas corresponde a Actividad II AR 4, y se plasma en el informe "Análisis de instrumentos, políticas y medidas) presentado que corresponde a las actividades I AR 2 y I AR 3

⁵ Correspondiente a la Actividad I AR 2 y Actividad I AR 3

⁶ Correspondiente a la Actividad II AR 3

II. Procedimiento de análisis

En el marco del presente Proyecto se analizaron exhaustivamente las opciones de mitigación incluidas en los Planes de Acción Nacionales de Energía, Transporte, Industria, Infraestructura, Agricultura y Bosques, y Cambio Climático⁷ elaborados con el fin de hacer posible la implementación de la primera NDC argentina mediante la remoción de las barreras identificadas, asociadas a cada opción⁸ y, adicionalmente, la identificación de nuevas medidas de mitigación, que resultan interesantes de analizar⁹.

Por otra parte, se procedió a desarrollar un enfoque metodológico propio para priorizar las medidas de mitigación y determinar aquellas medidas a ser analizadas con el mayor detalle, en las próximas fases del proyecto, considerando para ello tres dimensiones distintas:

1. Capacidad de mitigación,
2. Potencial transformacional, y
3. Factibilidad de implementación.

Luego, las opciones de mitigación se agruparon en lo que hemos denominado **“conjuntos de opciones de mitigación”**, tanto para el sector de Energía y Transporte como para el de AFOLU, a fin de analizar las opciones de acuerdo a los objetivos de mitigación que se proponen, independientemente del sector o subsector en el que se realizan, y facilitar así el desarrollo del análisis técnico-económico en profundidad como los instrumentos propuestos para viabilizar su efectiva implementación¹⁰.

Una vez priorizados los conjuntos más importantes (utilizando el mismo enfoque metodológico que el empleado para cada una de las medidas de mitigación), el equipo Decarboost Argentina construyó escenarios hacia el año 2050 considerando la carbono neutralidad como objetivo a ser alcanzado a ese año, y avanzar así en el análisis preliminar de factibilidad técnica de los conjuntos de opciones de mitigación seleccionados. Los escenarios permiten cuantificar los requerimientos de manera física¹¹ a lo largo del tiempo de cada uno de los conjuntos de opciones de mitigación priorizados de manera de lograr la carbono neutralidad.

⁷ Correspondiente a la Actividad II AR 1

⁸ Correspondiente a la Actividad I AR 1

⁹ La identificación de nuevas medidas corresponde a Actividad II AR4, y se plasma en el informe “Análisis de instrumentos, políticas y medidas) presentado en el informe de las Actividades I AR 2 y I AR 3

¹⁰ En el reporte de Análisis de instrumentos, políticas y medidas, se realizó una recopilación y revisión de las opciones de medidas e instrumentos de políticas, económicos-financieros, legales e institucionales, de información y educación y de desarrollo productivo, que permitan abordar las barreras existentes que puedan limitar las oportunidades de inversión bajas en carbono en la Argentina.

¹¹ MWh de energía no emisora de GEI, hectáreas forestadas, cantidad de vehículos eléctricos, entre otras

III. Opciones de mitigación

1. Introducción

De acuerdo con el informe del Proyecto sobre "Análisis de instrumentos, políticas y medidas"¹² se procedió a la agrupación de las opciones de mitigación revisadas y las nuevas identificadas en "conjuntos de opciones de mitigación".

A continuación, se presenta el contexto de los sectores y una lista de cada una de las opciones que integran los conjuntos de opciones definidos, una descripción de los conjuntos y sus implicancias, para luego proceder a la aplicación de la metodología de priorización.

2. Energía y transporte

La energía explica, según el último inventario de gases de efecto invernadero (GEI)¹³, el 51,3% de las emisiones de GEI de la República Argentina, con una tasa de crecimiento anual acumulativa del 1,3% en la última década. El transporte explica 14 puntos porcentuales de esa participación, lo que representa el 20% de las emisiones del sector energético.

El sector energético es un sistema complejo, formado por múltiples agentes que interactúan entre sí y con su entorno. Estos diversos conjuntos de agentes, agrupados en "cadenas", articulan formando los componentes básicos del sistema energético y, a su vez, se encuentran inmersos en un medio (sumergido a su vez en otros medios, o "anidado") que genera condiciones de borde y restringe sus grados de libertad.

La descarbonización del sector energético requiere de acciones sobre estas cadenas —de manera individual o de manera conjunta—, orientadas a influir, a grandes rasgos, sobre dos factores:

- En primer lugar, la intensidad energética de la economía; es decir, las unidades energéticas consumidas por punto del PIB, o bien las unidades energéticas consumidas para mantener o incrementar el bienestar —en todas sus dimensiones— de la población.
- En segundo lugar, la intensidad de GEI de ese consumo energético; es decir, la cantidad de emisiones generadas por cada unidad energética consumida.

¹² Correspondiente a la Actividad I AR 2 y Actividad I AR 3

¹³ Del año 2020 con datos al 2016.

El primero de estos factores, la intensidad energética, puede ser modificado mediante transformaciones estructurales de la economía o de sus sectores (por ejemplo, en una transición de una economía industrial a una economía de servicios, o el cambio modal de los sistemas de transporte), o bien mediante la implementación de políticas de eficiencia energética.

El segundo de los factores, la intensidad de GEI, puede ser influido principalmente mediante la sustitución de fuentes energéticas provenientes de combustibles fósiles, como los derivados del petróleo y el gas natural, por fuentes libres de emisiones como lo son la energía hidroeléctrica de gran porte, y las energías renovables que suelen ser denominadas "no convencionales" (como por ejemplo la solar, eólica, pequeña hidroelectricidad, biomasa moderna o biocombustibles).

Para incidir sobre estos factores (de intensidad y cantidad de emisiones de GEI), se consideran las opciones de mitigación agrupadas en conjuntos de opciones, independientemente de la tecnología y del sector en el que se realizan. Lo descripto se presenta en la Figura 1, a continuación.

Figura 1: Conjuntos de opciones de mitigación – Energía y Transporte



(*) refiere a las opciones de mitigación propuestas por el Proyecto

Generación eléctrica a partir de energías renovables

La electrificación de consumos sustituyendo el "consumo distribuido" de combustibles fósiles (por ejemplo, mediante motores de combustión interna) por el "consumo centralizado" de combustibles fósiles (por ejemplo centrales termoeléctricas a gran escala), según las distancias requeridas para la transmisión, no siempre resulta en una reducción neta de GEI y, por ende, alejarse de la transición hacia la carbono neutralidad (aunque sí tenga beneficios tangibles vinculados con la reducción de las emisiones de particulado, emisiones sonoras y de otros factores nocivos para la salud).

En este contexto, resulta necesaria y deseable **la planificación simultánea de la electrificación de los consumos energéticos, en conjunción con la descarbonización de la generación eléctrica y la implementación de medidas de eficiencia energética en la oferta y en la demanda, que se tornan en una tríada de políticas aptas para abordar la problemática de la mitigación en la producción y en el uso de la energía**, haciendo, a su vez, una utilización más eficiente de la infraestructura de transmisión existente y a construir.

El análisis de las opciones de mitigación para el sector energético de Argentina pone de manifiesto que, si la atención se centra exclusivamente en el sector de generación eléctrica, el potencial de reducción de emisiones de GEI resulta limitado e insuficiente, dejando fuera de las intervenciones actividades de consumo energético altamente intensivas en la quema de combustibles fósiles, y en consecuencia en emisiones.

Por otra parte, al establecerse un objetivo de "emisiones netas cero" para la producción y el consumo energético, la sustitución de fuentes de energía resulta acotada en términos de las opciones de combustibles sustitutos, tanto en materia de flexibilidad como en términos de escala.

Por lo tanto, para alcanzar una matriz energética de consumo descarbonizada y eficiente hacia el horizonte 2050, la electrificación de los usos energéticos debe jugar un papel central. Para ello, es necesario avanzar también en la electrificación de la demanda de energía.

Electromovilidad y sustitución de combustibles

Se denomina electromovilidad al conjunto de acciones estructuradas en un eje esencial para alcanzar los objetivos de mitigación de GEI asumidos como compromisos en la NDC de Argentina y para alcanzar una meta de descarbonización que permita lograr la neutralidad en carbono en 2050.

Esas acciones apuntan a sustituir la combustión de fósiles en los vehículos por energía eléctrica y, a su vez, en otro conjunto de acciones dirigidas al reemplazo de la producción de energía

eléctrica de origen térmico por fuentes de energía renovable preferentemente, o al menos fuentes no emisoras de CO₂. Esta sustitución de fuentes emisoras por no emisoras para el transporte se articula con el conjunto previamente enunciado.

El análisis conjunto de los requerimientos del sector transporte y del sector energía, permite un abordaje metodológico integrado que evita la subestimación de los esfuerzos de mitigación a partir de acciones sobre el parque automotor urbano particular y de transporte de pasajeros y sus implicancias desde el punto de vista del suministro de energía.

Eficiencia energética (EE)

La eficiencia energética abarca el 67,5% de las medidas de mitigación identificadas en los planes nacionales. Sin embargo, su contribución a la reducción de emisiones pareciera estar subestimada, y ello puede deberse a que cada sector trabaja en forma independiente sin tener en cuenta los beneficios de la eficiencia energética en sus proyectos.

A la vez, la atomización de los distintos actores involucrados vuelve muy difícil que desde una instancia centralizada se pueda tener éxito en la óptima implementación de estas medidas y de otras que adicionalmente se podrían agregar.

Las inversiones necesarias en eficiencia energética son una actividad transversal a todos los sectores económicos y con una gran atomización de los beneficiarios. Los proyectos de EE se desenvuelven a nivel nacional, provincial o municipal, con la participación de los actores privados. Por lo tanto, se trata de medidas que involucran a una diversidad de sectores y usuarios, así como tecnologías, lo que implica poner a disposición los servicios de eficiencia energética, independientemente de las tecnologías y sectores de actividad donde se implemente.

Las políticas que hacen énfasis en la demanda –tal como se implementan actualmente en muchos países– pueden producir un ahorro energético equivalente al generado por las políticas que se focalizan en los cambios en las fuentes de energía, pero según los casos a un costo mucho menor y con impactos sociales, ambientales y en la salud de escala más reducida.

Otras opciones en el sector Energía

Aquí se incluyen aquellas opciones asociadas a la energía que no forman parte de los conjuntos de opciones de mitigación anteriores, muchas de ellas de cierta especificidad sectorial.

Otras opciones en el sector Transporte

Aquí se incluyen aquellas opciones del sector de transporte que no forman parte de los conjuntos de opciones de mitigación anteriores.

3. AFOLU

Según el último inventario de GEI (BUR 3, 2016), el sector AFOLU representó el 37% de las emisiones totales de la República Argentina. Este sector abarca las emisiones y capturas provenientes de diversos usos, y cambios de uso de la tierra (cultivos, tierras de pastoreo, bosques y plantaciones forestales), como también las emisiones propias de la ganadería (fermentación entérica y excretas).

Según el BUR 3 del año 2016, dentro del sector AFOLU, la ganadería contribuyó con el 58% de las emisiones, de las cuales los bovinos de carne y leche representaron el 90% del total de las emisiones ganaderas (fermentación entérica y excretas). El 10% restante correspondió a "otras ganaderías" (aves, porcinos, ovinos y equinos). Considerando únicamente las emisiones de metano provenientes de la fermentación entérica de rumiantes (básicamente ganadería bovina de carne y leche), representan cerca del 65% de las emisiones de la ganadería y el 37% del sector AFOLU.

Por otra parte, la variación interanual de las emisiones del sector no sólo se explica por el crecimiento del área cultivada, el stock ganadero o el área forestada, sino también por las emisiones generadas por cambios de uso, en particular por la deforestación. Si bien entre 1990 y 2004 este sector incrementó sus emisiones a un ritmo del 3,4% anual, entre 2004 y 2016, la tendencia fue decreciente con una reducción media anual de 3,3 %. De acuerdo a un informe elaborado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en 2020, el porcentaje anual de pérdida de bosque nativo respecto del total de bosque nativo remanente en las distintas regiones forestales del país mostró una disminución desde la sanción de la Ley Nacional N° 26.331 de Presupuestos Mínimos para la Protección Ambiental de los Bosques Nativos (diciembre de 2007), desde aproximadamente 0,9 % anual hasta su mínimo (0,34 % anual) en el año 2015. Desde entonces, la tasa de deforestación se incrementó, alcanzando en 2018 una superficie desmontada de 183.368 hectáreas (0,42 % anual).¹⁴

¹⁴ Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2020. Causas e impactos de la deforestación de los bosques nativos de Argentina y propuestas de desarrollo alternativas. Disponible en <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/bosques/desmotes-y-alternativas>

Conforme a lo señalado por el Ministerio de Ambiente¹⁵, el proceso de deforestación se aceleró entre finales de 1990 y principios del 2000, con la expansión agrícola desde Región Pampeana hacia el Parque Chaqueño como motor principal. El surgimiento de la soja transgénica, y la siembra directa asociada a otros paquetes tecnológicos, aumentó la rentabilidad de este cultivo y su potencial para expandirse a tierras consideradas previamente marginales para la producción agrícola. En la actualidad, la tendencia a esta expansión ha mermado, principalmente como consecuencia de la baja de los precios de los productos agrícolas en los mercados internacionales, al incremento de los precios de la tierra en la región Chaqueña y a la escasez de tierras remanentes con aptitud agrícola. No obstante, persiste aún una fuerte presión para convertir la superficie boscosa a la actividad ganadera mediante planteos ganaderos intensivos basados en la producción de pasturas a cielo abierto. Por otra parte, en opinión de algunos actores, de modificarse el contexto internacional, con nuevos aumentos de los precios de productos agropecuarios, o el contexto nacional, con reducciones de las retenciones a la soja, la situación podría parcialmente revertirse dando lugar a una nueva "ola" de expansión de la agricultura.

El sector AFOLU está integrado por una gran cantidad de productores en distintas regiones del país con características diversas. Frecuentemente, el productor integra más de una actividad dentro de su explotación rotando cultivos agrícolas, haciendo ganadería e incluso forestación, además de participar en los procesos de cambios de uso de la tierra. Las características regionales pueden limitar o potenciar la capacidad de mitigación de los actores a nivel local. El productor interactúa con otros actores dentro de las distintas cadenas (agrícolas, ganaderas y forestal) y se encuentra también inmerso en el contexto macroeconómico nacional. Esto último, puede también limitar o potenciar la adopción de prácticas y tecnologías orientadas a la mitigación de emisiones de GEI.

Las acciones de mitigación propuestas para el sector se concentran en la agricultura extensiva, la ganadería y el sector forestal de bosques implantados. Algunas de las acciones propuestas están relacionadas con la adopción de tecnologías de insumos (por ejemplo, inhibidores de la volatilización de la urea) y otras con tecnologías de procesos (prácticas de manejo o sistemas de producción integrados).

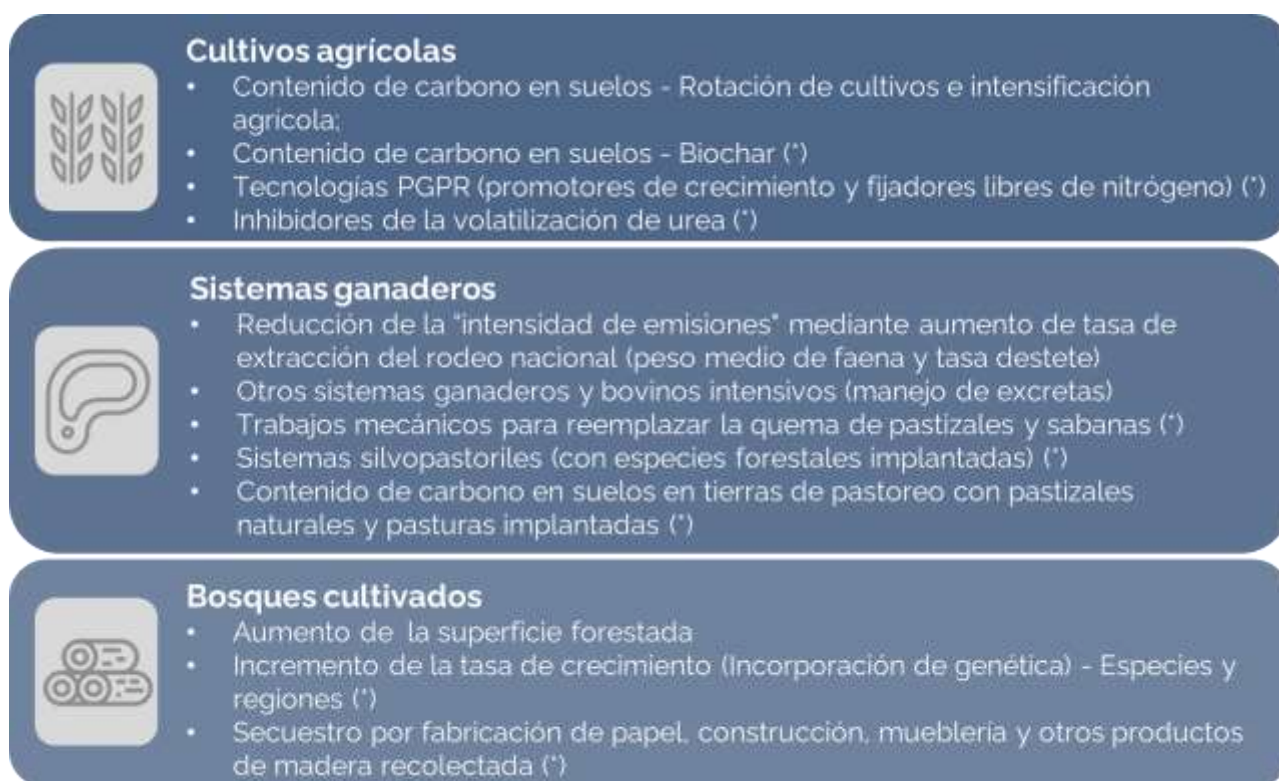
La adopción de tecnologías de procesos suele ser más lenta que la incorporación de tecnologías de insumos. Si bien el gran número de actores dispersos en un extenso territorio puede ser una barrera, también el productor argentino se ha caracterizado por ser un rápido adoptador de nuevas tecnologías y el sector cuenta con una amplia red de extensión pública y privada, incluyendo a actores que se dedican al desarrollo de tecnologías.

¹⁵ Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2020. Causas e impactos de la deforestación de los bosques nativos de Argentina y propuestas de desarrollo alternativas. Disponible en <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/bosques/desmotes-y-alternativas>

Además de las acciones propuestas en cultivos agrícolas y ganadería, la expansión del subsector forestal tiene un potencial de mitigación relativo mayor dentro del sector AFOLU. Las barreras identificadas para el sector forestal son en cierto modo estructurales y están más allá del alcance del productor, dependiendo de políticas que incrementen la demanda por parte de la cadena foresto-industrial.

Si bien algunas de estas actividades se realizan en simultáneo por productores agropecuarios, no necesariamente ocurre en las diversas regiones del país, por lo tanto, se plantean conjuntos de opciones de mitigación según la actividad principal del establecimiento productivo. En la Figura 2 a continuación se presentan los conjuntos de opciones de mitigación del sector de AFOLU.

Figura 2: Conjuntos de opciones de mitigación - AFOLU



(*) refiere a las opciones de mitigación propuestas por el Proyecto

Cultivos agrícolas

En el conjunto de opciones de mitigación de cultivos agrícolas se incluyen algunas acciones relacionadas a la introducción de nuevas tecnologías (PGPR¹⁶, Biochar e inhibidores de la

¹⁶ Plant growth-promoting rhizobacteria, o rizobacteria promotora del crecimiento vegetal

volatilización) y otras acciones relacionadas con la mejora de procesos o prácticas de manejo (rotaciones con gramíneas y pasturas). Este conjunto de medidas busca incrementar el secuestro de carbono en el suelo y disminuir las emisiones por uso de fertilizantes, tanto totales como por unidad de producto (CO₂eq/tn grano o biomasa producida).

Si bien estas acciones apuntan principalmente a establecimientos cuya actividad núcleo es la agricultura, pueden complementarse con otras actividades del sector AFOLU, como la ganadería y forestación.

- El secuestro de carbono en suelos depende de la secuencia de cultivos en rotación y del nivel de productividad. Adicionalmente, varía según la región, ya que la dinámica del carbono depende también del clima y del tipo de suelo. Una mayor producción anual de biomasa, debida a un mayor cultivo de gramíneas y mejoras en el rendimiento, favorece el balance de carbono en el suelo.
- Otra alternativa para el secuestro de carbono en suelos es la aplicación de Biochar, cuya disponibilidad depende de la instalación de capacidad de producción de biocarbón, así como de la distancia a los lugares donde se localiza su fabricación y de su relación costo/beneficio.
- El uso de inhibidores de la volatilización de la urea es una acción muy efectiva y sencilla de implementar a nivel nacional. Aunque esta fuente de emisión (fertilizantes nitrogenados) representó en 2016 el 5% del sector AFOLU, con 6.9 MtCO₂eq, la reducción de emisiones por uso de fertilizantes nitrogenados es relevante, ya que, si se busca a futuro un incremento de la producción de biomasa por mejoras en el rendimiento y por mayor cultivo de gramíneas, esto implicaría un uso creciente de fertilizantes nitrogenados.

El desarrollo y mayor uso de tecnologías PGPR favorecería la producción de biomasa sinergizando el uso de fertilizantes. El efecto de las tecnologías PGPR ha sido evaluado en general como un efecto aditivo y no como un reemplazo de los fertilizantes nitrogenados.

Sistemas ganaderos

Existe consenso que la mejor estrategia de mitigación de las emisiones del sector ganadero es el incremento de la eficiencia del rodeo nacional bovino, buscando una reducción de la "intensidad de emisiones", es decir por kilo de carne o litro de leche producidos. De esta manera, se podría incrementar la producción total de carne y leche con un incremento relativo menor del número de cabezas totales. Esta estrategia ha sido propuesta en el Plan de Acción Nacional de Agro y Cambio Climático de la Argentina (2019), e incluso ha sido considerada como una acción de mitigación en la NDC de la República Oriental del Uruguay.

En menor medida, las emisiones provenientes de las excretas en sistemas intensivos donde se realiza gestión del estiércol representaron aproximadamente el 5% del total de las emisiones ganaderas (directas e indirectas) y el 2,9 % del sector AFOLU. La acción de mitigación sobre estos sistemas de gestión de estiércol permitiría una reducción parcial con sistemas mejorados o casi total con sistemas de producción de bioenergía (biodigestores).

El secuestro de carbono en tierras de pastoreo tiene un potencial interesante, pero, al igual que en tierras de cultivo, está ligado a prácticas de manejo que permitan un incremento en la producción de biomasa anual, atendiendo las diferencias regionales en las variables climáticas y de suelo. Otra vía de captura de carbono en unidades de producción ganadera es la integración con plantaciones forestales. En rigor, esta última medida estaría asociada al incremento del área forestada, pero daría a la ganadería pastoril un valor adicional, a la vez que ampliaría la oferta de tierras con destino a la actividad forestal.

Las emisiones por quema de pastizales (quema de sabanas) representaron en 2016 un 0,66% del total de emisiones del sector AFOLU (0,9 MtCO₂e). Si bien es una categoría menor, sus emisiones pueden ser reducidas por el uso de métodos mecánicos y muy probablemente generando una mayor productividad del sitio, mejorando el balance de carbono del suelo y los índices ganaderos de animales en pastoreo.

Por lo tanto, en ganadería intervienen acciones de mitigación relacionadas a mejoras en los procesos de producción que: a) incrementen la generación de forraje evitando quemar y disminuyendo o capturando carbono en el suelo; b) mejoren la eficiencia de productividad del rodeo para disminuir la intensidad de emisiones; c) implementen sistemas de gestión de excretas en sistemas intensivos que mitiguen emisiones a través de la generación de bioenergía.

Bosques cultivados

La actividad forestal permite una captura significativa de carbono dentro del sector AFOLU en Argentina. El país tiene importante potencial para el desarrollo de la cadena foresto-industrial.

Las acciones de mitigación en el subsector forestal no sólo incluyen el incremento del área, sino también aumentos en la tasa de crecimiento anual mediante la introducción de mejoras genéticas de las especies implantadas.

También el valor agregado a través del crecimiento en la producción de productos de madera recolectada para construcción y mueblería, de manera de dar mayor valor agregado a lo largo de toda la cadena del sector.

IV. Enfoque metodológico para la priorización

Debido a que las medidas y opciones de mitigación se encuentran en diferentes fases de planificación, desarrollo, e incluso de materialización de la inversión, y a la vez en razón que la concreción de las medidas se enfrenta con restricciones presupuestarias y de financiamiento de la acción climática, la decisión sobre el posible desarrollo de esas opciones requeriría información precisa sobre los costos de abatimiento, una cuidadosa consideración de los riesgos de aplicación para evitar una mala asignación de recursos escasos, así como sus implicaciones en términos macroeconómicos y de contribución al logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Los criterios utilizados frecuentemente en la literatura para la selección de instrumentos de política incluyen los siguientes (Azqueta, 2007; Duval, 2008; Kneese y Bower, 1968; OECD, 1991; OECD, 1997a; IEA/OECD, 1997; Bohm & Rusell, 1985; Keohane et al, 1998; Goulder y Parry, 2008; Pizer, 2002; Newell y Pizer, 2008; Webster et al, 2010; Aldy y Stavins, 2008):

- **Eficiencia:** Se analiza si se logra alcanzar el objetivo ambiental propuesto
- **Equidad:** Se refiere a los impactos distributivos de los instrumentos de política sobre los diferentes actores afectados.
- **Costos administrativos y factibilidad de implementación:** Se refiere a los costos de introducción y manejo de los instrumentos y al monitoreo de su cumplimiento.
- **Aceptabilidad política:** Se refiere a la aceptación del instrumento por parte de los actores afectados por el mismo y a la capacidad relativa de lobby de cada uno.
- **Innovación tecnológica:** Se evalúa, en el largo plazo, la capacidad de los diferentes instrumentos de política para fomentar la innovación y la difusión de tecnologías bajas en emisiones, de modo tal de reducir los costos futuros de la mitigación.

Debido a que no existe un instrumento de política que sea superior a los otros, considerando la totalidad de los criterios, y a que existen trade-off y condiciones bajo las cuales algunos instrumentos son preferibles a otros, dependiendo de cuál sea el objetivo prioritario de política, a continuación, se seleccionan los criterios sobre los cuales se realizará la priorización de medidas para la consideración y el desarrollo de instrumentos de política y financieros.

La revisión de las medidas de mitigación se lleva a cabo con el objetivo final de evaluarlas en detalle y desarrollar un plan de inversión para las medidas de mitigación priorizadas y favorecer el cumplimiento de los compromisos asumidos a nivel nacional.













Para ello, se aplicó nuestro propio enfoque metodológico y se consideraron tres dimensiones diferentes: i) mitigación, ii) objetivos transformacionales, y iii) factibilidad:

- Capacidad de mitigación: impactos en términos de reducción o absorción de GEI

- Potencial transformacional: impactos positivos en términos de desarrollo sostenible, incluyendo, por ejemplo, crecimiento económico, generación de empleo y desarrollo de nuevas tecnologías o mercados, así como favorecer al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible
- Factibilidad de implementación: basado en la viabilidad política y administrativa para su diseño, implementación y monitoreo, reporte y verificación (MRV), así como por la existencia de recursos financieros para ser ejecutado.

Para cada una de esas dimensiones de la evaluación, se creó una escala que refleja grados crecientes de capacidad mitigativa, transformación y de factibilidad. Para facilitar la percepción gráfica, se asignó un color a esos diferentes grados en las escalas que se expone en la Tabla 1 a continuación:

Tabla 1: Escalas por criterio de evaluación

Criterio de evaluación	Escala	Color
<i>Capacidad mitigación</i>	Escaso	
	Medio bajo	
	Medio alto	
	Alto	
<i>Potencial transformacional</i>	Escaso	
	Medio bajo	
	Medio alto	
	Alto	
<i>Factibilidad implementación</i>	Escaso	
	Medio bajo	
	Medio alto	
	Alto	

Fuente: Elaboración propia.






Se debe destacar que las valoraciones a cada uno de los criterios de evaluación para las medidas de mitigación o grupos de medidas son relativas al sector y no en términos absolutos.

V. Resultados de la priorización

En primer lugar, la matriz de priorización se aplica a cada una de las medidas de mitigación (Ver Anexo 1). Se incluye en ese anexo también las metas de mitigación y las barreras para su implementación, de acuerdo al análisis realizado y presentado de actividades anteriores de este proyecto.

A continuación, se aplica la metodología de priorización a los conjuntos de opciones de mitigación (Tabla 2) para identificar aquellos conjuntos que serán analizados en mayor medida y avanzar en su análisis de factibilidad técnico-económico.

Tabla 2: Matriz de priorización

Conjuntos de medidas	Criterio de evaluación	Scoring	Evidencia
Generación eléctrica a partir de ER	Capacidad de mitigación		<ul style="list-style-type: none"> ➤ De sustituirse las fuentes actuales de generación eléctrica por fuentes libres de emisiones, según la estructura de consumo actual, dicha sustitución equivaldría a una reducción del 13,1% de las emisiones de GEI de la República Argentina (47,8 MtCO_{2e}); ➤ En caso de electrificarse también el consumo energético del transporte terrestre de pasajeros se sumaría a esta reducción 45,5 MtCO_{2e} adicionales (12,5% del total, sumando entre ambas, a valores del último inventario de GEI, 94,4 MtCO_{2e} o el 25% de las emisiones totales del país, sin considerar efectos de segunda ronda, como el impacto aguas arriba en los sectores de refinación y de producción de hidrocarburos, ni el potencial de electrificación de otros usos energéticos
	Potencial transformacional		<ul style="list-style-type: none"> ➤ La descarbonización del sector eléctrico constituye el pre-requisito fundamental para la descarbonización del sector energético, y en conjunción con la electrificación de consumos, se torna en la medida transformacional por excelencia del sistema energético. ➤ La incorporación masiva de fuentes renovables a la red eléctrica cataliza (y requiere de) transformaciones sustantivas en: <ul style="list-style-type: none"> ◦ Cadenas productivas ◦ Expansión de la infraestructura ◦ Mercados eléctricos ◦ Geopolítica federal doméstica ◦ Exposición a los precios internacionales
	Factibilidad de implementación (Técnica/Política /Económica Financiera)	  	<ul style="list-style-type: none"> ➤ En el corto plazo, la holgura en términos de disponibilidad de potencia eléctrica representa una barrera sustancial para la sustitución, toda vez que el desplazamiento de potencia existente representaría un incremento de corto plazo en el costo del sistema. ➤ No obstante, en el mediano y largo plazo, los requerimientos de inversión vinculados con la expansión de la capacidad instalada resultan, incluso a valores de hoy, competitivos con las fuentes de generación termoeléctrica a sustituir, presentando una trayectoria de costos decreciente, al igual que el almacenamiento. No obstante, las restricciones al acceso y el alto costo del capital, así como la resistencia por parte de los lobbies







			<p>sectoriales/provinciales son cuestiones que deben ser abordadas para permitir esta materialización.</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ La descentralización mediante fuentes renovables (principalmente solar fotovoltaica) cuando resulte conveniente para minimizar las pérdidas de energía eléctrica por transporte y distribución de energía eléctrica, requiere de cambios fundamentales e inversiones considerables.
<i>Electromovilidad y sustitución de combustibles</i>	Capacidad de mitigación	●	<ul style="list-style-type: none"> ➤ El transporte representa en la Argentina el 31% del consumo energético del país, y el 90% de ese consumo proviene del uso del petróleo y el gas natural. Durante la última década, el transporte fue responsable de aproximadamente 60 MtCO₂ por año en promedio, aproximadamente el 15% de las emisiones totales del país, y con una tasa de crecimiento proyectada del orden del 6% anual. Si no se produce una sustitución por vehículos eléctricos, esta incidencia tenderá a crecer.
	Potencial transformacional	●	<ul style="list-style-type: none"> ➤ La electrificación del transporte urbano producirá una transformación sustancial en el aparato productivo, con un cambio esencial en la industria automotriz, y su cadena de valor. También, la tecnología incorporada en el EV, la carga y descarga sobre las redes eléctricas, los avances sobre el vehículo autónomo, la inteligencia artificial y la digitalización implican el desarrollo de la innovación y la aparición de nuevos emprendimientos ➤ Como resultado de la quema de combustibles fósiles se generan emisiones de GEI y también de material particulado, óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), Compuestos Orgánicos Volátiles Distintos del Metano (COVNM) y dióxido de azufre (SO₂). Disminuir la concentración de estas emisiones a la atmósfera, tendrá un impacto significativo en el sistema de salud, tanto en términos de mortalidad y morbilidad como en los costos asociados.
	Factibilidad de implementación (Técnica/Política /Económica Financiera)	● ● ●	<ul style="list-style-type: none"> ➤ La factibilidad técnica de la penetración del EV no presenta mayores dudas. Grandes fabricantes ya han anunciado que a partir de 2035 solo producirán autos eléctricos; la factibilidad económica debe todavía ser constatada en la medida que el costo de producción del EV se ponga en situación de paridad en el mercado con los vehículos con motores de combustión interna. La caída de los precios de las baterías es un dato confirmado y la continuidad de esta tendencia hará que los EV sean competitivos.

V. Resultados de la priorización







<i>Eficiencia Energética</i>	Capacidad de mitigación		<ul style="list-style-type: none"> Las acciones de mitigación en eficiencia energética en el sector energético son las segundas en importancia, luego de la construcción de infraestructura
	Potencial transformacional		<ul style="list-style-type: none"> La implementación de proyectos de eficiencia energética en todos los sectores mejora sustancialmente los resultados económicos de la empresa y de la macroeconomía. Pero las transformaciones que son capaces de producir en el comportamiento cotidiano, de las empresas, de los usuarios individuales y de la sociedad en general cambiarán los modelos de negocios actuales, y probablemente la caracterización del abastecimiento energético como servicio público. El empleo de sistemas de gestión individual de la demanda, gracias a los medios puestos a disposición por la tecnología informática, e-learning, manejo de grandes bases de datos, y la inteligencia artificial, exceden ampliamente al sector energético y se propagan al resto de la sociedad.
	Factibilidad de implementación (Técnica/Política /Económica Financiera)		<ul style="list-style-type: none"> La factibilidad técnica de la penetración de proyectos de eficiencia energética no presenta mayores dudas, sin embargo, la diversidad de sectores, usuarios, requieren de la creación de una industria de eficiencia energética capaz de poner a disposición de las industrias, y los usuarios los proyectos y el financiamiento adecuado para lograrlo. Los subsidios a la energía demoran del desarrollo de un mercado de eficiencia energética.
<i>Otras opciones Energía</i>	Capacidad de mitigación		<ul style="list-style-type: none"> Se incluyen generación nuclear y la captura y almacenamiento geológico de carbono en centrales térmicas. Son acciones con un potencial de mitigación importante. No obstante, se trata de medios de mitigación para producción eléctrica que se busca reemplazar totalmente con fuentes de energía renovable.
	Potencial transformacional		<ul style="list-style-type: none"> Estas opciones no tienen capacidad para transformar el modo de producir y consumir energía, más bien buscan mantener el statu-quo sin grandes cambios estructurales en los modelos energéticos y son funcionales al mantenimiento de las fuentes fósiles para la generación de electricidad
	Factibilidad de implementación		<ul style="list-style-type: none"> Existen fuertes resistencias sociales por la intensidad de capital que requiere la construcción de esta infraestructura y debido a que son fuertemente cuestionadas desde el punto de vista ambiental. En el caso de captura y

¹⁷ Debido a la diversidad de opciones de mitigación contempladas en este conjunto de medidas la factibilidad se analiza de manera agregada sin distinguir entre las acciones técnicas, políticas y económico-financieras.

V. Resultados de la priorización

			almacenamiento de carbono en centrales térmicas, las estructuras geológicas apropiadas se encuentran en general alejadas de su localización y, por lo tanto, la infraestructura requerida para su concreción es además inviable técnicamente.
<i>Otras opciones Transporte</i>	Capacidad de mitigación		➤ Estas medidas están en general orientadas a la rehabilitación del sistema ferroviario y a la implementación de soluciones en el transporte público que buscan mejorar la eficiencia en el consumo de combustibles de estos medios con ligeras ganancias de reducción de emisiones, e inclusive con la posibilidad de incrementar las mismas por un mayor uso de estos sistemas.
	Potencial transformacional		➤ En general no buscan incorporar cambios estructurales sino mejorar los rendimientos existentes y acompañar estos con supuestas reducciones de emisiones por mejor utilización del transporte de pasajeros y de carga.
	Factibilidad de implementación		➤ Estas medidas tienen alguna factibilidad de implementación en aquellos casos donde no se requieran grandes obras de infraestructura, como sería la rehabilitación completa del sistema ferroviario que habilite los cambios modales de transporte, de camión a ferrocarril en el transporte de cargas y mercaderías. La mejora en la calidad de combustible planteada para el transporte público de pasajeros es factible, también es de muy dudosa factibilidad lo que se denomina modernización aerocomercial.
<i>Cultivos agrícolas</i>	Capacidad de mitigación		➤ La captura neta de carbono en el suelo es un proceso de largo plazo y variable entre años y según regiones. En el caso de las tecnologías como los inhibidores de volatilización y productos PGPR, su adopción puede ser rápida, pero de relativo bajo impacto anual en la reducción de emisiones relativas al sector AFOLU. No obstante, deben considerarse todas las acciones integradas.
	Potencial transformacional		➤ La captura de carbono en suelos, tiene co-beneficios como la conservación del recurso, una mejora o mantenimiento de la productividad, se evita la erosión y la degradación. Por otra parte, las rotaciones diversifican el riesgo productivo y dan movimiento a más de una cadena productiva a nivel local.
	Factibilidad de implementación		➤ La captura de carbono en cultivos es un tema de interés en el sector y el productor busca continuamente la incorporación de mejoras en su sistema. No es sencilla su implementación, pero factible en el mediano a largo plazo.

V. Resultados de la priorización

<i>Sistemas ganaderos</i>	Capacidad de mitigación		<p>➤ La mejora en la eficiencia productiva tendría un efecto sinérgico en la actividad, impulsando una mayor producción, con la consecuente reducción de intensidad de las emisiones. A la vez, el aumento de implantación de pasturas y enriquecimiento de los recursos naturales para sostener la producción tendría impactos positivos en el incremento de materia orgánica (MO) o carbono en suelo.</p>
	Potencial transformacional		<p>➤ La ganadería bovina es una actividad que emplea y establece comunidades en todo el territorio. La mejora en la actividad ayudaría a afianzar los modelos productivos y a incorporar a productores familiares o asalariados a un sistema más equitativo y con resguardo social. La brecha de mejora impulsa a la extensión y capacitación de profesionales que deberán ayudar a los productores, primer eslabón de una cadena de producción con mucho potencial de crecimiento.</p>
	Factibilidad de implementación		<p>➤ La mejora esperada de la ganadería depende de tecnologías de procesos. Los productores son habidos adoptantes de insumos, pero los procesos son complejos y multifactoriales. Requiere de políticas de largo plazo y de cambios estructurales.</p>
<i>Bosques cultivados</i>	Capacidad de mitigación		<p>➤ El incremento del área con bosques implantados para el periodo 2020-2050 tendría una capacidad de mitigación media alta, pero dependerá del ritmo de crecimiento anual. Si este incremento va acompañado de una mejora genética continua y el desarrollo del sector foresto industrial, en conjunto daría lugar a capturas significativas.</p>
	Potencial transformacional		<p>➤ La agregación de valor y el desarrollo de una cadena foresto-industrial posee la capacidad de mejorar sustancialmente los resultados económicos del sector y posee efectos positivos en términos de generación de empleo.</p>
	Factibilidad de implementación		<p>➤ Si bien las condiciones actuales macroeconómicas y de la demanda local de madera limita la expansión del sector forestal, existen los recursos y las capacidades para dar un impulso a la actividad.</p>

Fuente: Elaboración propia

En el caso del sector de Energía y Transporte, de los cinco conjuntos de medidas de mitigación evaluados según su capacidad de mitigación, potencial de transformación y factibilidad, resultan en la priorización de tres conjuntos clasificados con las escalas más altas de la matriz de valoración. Los conjuntos seleccionados son los siguientes:

- Generación eléctrica a partir de ER,
- Electromovilidad y sustitución de combustibles
- Eficiencia Energética

En cuanto a AFOLU, considerando que los tres conjuntos de medidas de mitigación analizados obtuvieron escalas relativamente altas, se continuarán analizando cada uno de ellos, a saber:

- Cultivos agrícolas
- Sistemas ganaderos
- Bosques cultivados

VI. Evaluación preliminar de factibilidad

De acuerdo a los resultados de la priorización de los conjuntos de mitigación de cada uno de los sectores, el equipo Decarboost Argentina construyó escenarios hacia el año 2050 considerando la carbono neutralidad como objetivo a ser alcanzado a ese año¹⁸, y avanzar así en el análisis preliminar de factibilidad técnica-económica. Los escenarios que se presentan en esta sección permiten cuantificar los requerimientos de manera física¹⁹ a lo largo del tiempo de cada uno de los mencionados conjuntos.

1. Energía y Transporte

Se realiza a continuación un primer abordaje al análisis de factibilidad de los tres conjuntos de opciones de mitigación priorizados para la descarbonización del sector energético: Generación eléctrica a partir de ER; Electromovilidad y sustitución de combustibles; y Eficiencia energética.

Para cada conjunto se cuantificarán los requerimientos en términos físicos: energía sustituida, capacidad instalada, parque automotor eléctrico a ser incorporado y requerimientos de inversión en nueva capacidad de generación eléctrica.

Configuración de escenarios

La presente evaluación preliminar de factibilidad para la implementación de los conjuntos priorizados ha sido estructurada metodológicamente en dos escenarios, que serán evaluados respecto del escenario de línea de base. Estos escenarios tienen en cuenta las siguientes hipótesis:

- **Escenario de línea de base** (*business as usual* o BAU), en el cual los consumos del sector energético siguen las tendencias históricas;
- **Escenario de electrificación**, en el cual todos los consumos de combustibles fósiles en los sectores residencial, comercial, industria y transporte son reemplazados por electricidad producida a partir de medios no emisores de GEI en la mayor medida posible con las tecnologías económicamente viables en la actualidad y vislumbradas en el horizonte de evaluación;
- **Escenario de electrificación con cambios modales y de comportamiento**, en el cual se asume que en año horizonte, los consumos van a estar electrificados y además se asumen nuevas hipótesis en el comportamiento de los consumidores: del lado de la oferta aparición de los consumidores-productores; del lado de la demanda maximización de la eficiencia

¹⁸ De acuerdo a los compromisos asumidos por el gobierno nacional.

¹⁹ MWh de energía no emisora de GEI, hectáreas forestadas, cantidad de vehículos eléctricos, entre otras

energética, impulsada por la creación de la industria de empresas de servicios energéticos (ESE), y en relación al transporte incorporación del concepto de transporte como servicio (TaS), maximización del transporte público (electrificado o maximizando el empleo de biocombustibles en economías regionales); cambios de combustibles en transporte de cargas de larga distancia (biocombustibles, hidrógeno y Gas Natural Licuado) y media distancia (biocombustibles, hidrógeno y GNC); y cambios modales en el transporte de cargas, maximizando el transporte fluvial y ferroviario.

El método consiste en proyectar el año base (2018) hasta el año horizonte (2050), en el Escenario BAU, utilizando como factores explicativos la evolución histórica del consumo para cada producto energético, la evolución del Producto Interno Bruto (PIB), la evolución del ingreso medio; y el crecimiento del parque automotor particular.

En los Escenarios de electrificación y electrificación con cambio modal de transformación de los sectores, se analizan las trayectorias posibles tomando como objetivo emisión neta cero en 2050, y de allí retroceder (método de *backcasting*) hasta el presente fijando objetivos posibles en etapas intermedias mediante el establecimiento de años de corte (2030; 2040), respecto del escenario BAU.

En esta instancia preliminar de evaluación se ha puesto el foco en el escenario de electrificación, modelizado sobre la base de supuestos consistentes con tres niveles de evolución del Producto Interno Bruto (PIB). La Tabla 3 sintetiza los conjuntos de escenarios evaluados en el marco del proyecto:

Tabla 3: Síntesis de configuración de escenarios para Argentina y su grado de detalle abordado en esta instancia de evaluación

	Evolución del PIB		
	Bajo	Medio	Alto
Escenario Línea de base (BAU)	Abordado de manera completa	Abordado de manera simplificada	Abordado de manera simplificada
Escenario Electrificación	Abordado de manera completa	Abordado de manera simplificada	Abordado de manera simplificada
Escenario Electrificación con cambios modales y de comportamiento	Abordado de manera simplificada	Abordado de manera simplificada	Abordado de manera simplificada

Fuente: Elaboración propia.

Respecto de las tasas de evolución de los niveles de PIB utilizados, hipótesis y desarrollo específico de la modelización, los mismos se detallan en la síntesis metodológica presentada en Anexo 2.

Principales resultados de la modelización

Para alcanzar la carbono neutralidad en el año 2050, las emisiones netas de carbono de la República Argentina deben ser nulas, por lo que habrá que seleccionar las características que deberían tener las trayectorias compatibles con el cumplimiento de ese objetivo, llevando a la mínima expresión posible las emisiones provenientes del sector energético.

De esta manera, se obtienen requerimientos de manera física²⁰ a lo largo del tiempo para cada uno de los conjuntos de opciones de mitigación.

Partiendo de un contexto donde la participación de los combustibles fósiles es abrumadoramente preponderante, en los próximos 30 años las trayectorias a seguir son extremadamente exigentes, obligando a electrificar:

- 60% del consumo de energía final en el sector transporte,
- cerca del 95% en los sectores residencial, comercial y
- cerca del 80% del consumo final industrial,

En el escenario de electrificación se requiere en forma simplificada que:

- La mayoría de los vehículos del parque automotor liviano deben convertirse a energía eléctrica;
- Todo el consumo de gas y GLP en el sector residencial y comercial debe sustituirse por consumo eléctrico;
- Las mejoras de eficiencia con relación a un escenario tendencial de demanda deben ser al menos del 20%;
- La generación eléctrica libre de emisiones debe alcanzar más del 90% del total de electricidad producida.

La electrificación proyectada (**electrificar**), considera además escenarios que agregarán demanda a la producción de energía eléctrica, que en la actualidad es de más del 60% en base a la quema de fósiles. Por lo tanto, los combustibles fósiles deberán ser sustituidos por medios de producción no emisores de GEI (**descarbonizar**), incluyendo hidroelectricidad, nucleoelectricidad, energías renovables no convencionales, como la eólica, la solar y la biomasa. Asimismo, la intensidad energética se debe reducir con relación a un escenario tendencial de demanda mediante medidas de eficiencia energética y cambios modales (**reducir**), mediante el abordaje de nuevos modelos de negocios que reemplacen las funciones que actualmente brindan las empresas de servicios públicos de electricidad, por nuevas funciones con mayores niveles de descentralización, creando la figura del productor-consumidor. Los consumos que no

²⁰ MWh de energía no emisora de GEI, hectáreas forestadas, cantidad de vehículos eléctricos, entre otras

puedan ser electrificados deberán, en consecuencia, para cumplir con estos requisitos, provenir de fuentes libres o extremadamente bajas en emisiones de GEI (**sustituir**).

Atendiendo estas circunstancias, la estrategia de descarbonización para el sector energético y de transporte consiste en cuatro pilares:

- **Electrificar** el mayor volumen posible de usos energéticos, con especial énfasis en los sectores de consumo con mayor participación de combustibles fósiles —y por ende de mayor intensidad de emisiones de GEI—;
- **Descarbonizar** la generación de energía eléctrica a los fines de que dicha electrificación resulta más efectiva en la reducción de emisiones de GEI, procurando la descentralización paulatina mediante fuentes renovables (principalmente solar fotovoltaica) cuando resulte conveniente para minimizar las pérdidas de energía eléctrica por transporte y distribución de energía eléctrica;
- **Reducir** la intensidad energética de los servicios utilizados mediante la aplicación de medidas de eficiencia energética;
- Y finalmente, **sustituir** los consumos de energía final remanentes (no electrificados) por combustibles bajos o nulos en emisiones de GEI durante su ciclo de vida, como los biocombustibles líquidos y gaseosos y el hidrógeno bajo en carbono.

A continuación, se describen los escenarios de descarbonización en función de los conjuntos de mitigación priorizados y que su implementación contribuye a alcanzar los pilares de la descarbonización del sector energético y de transporte identificados anteriormente.

Generación de energía eléctrica a partir de energías renovables

En la actualidad, la electricidad representa el 21% del consumo de energía final. Esta participación deberá crecer sostenidamente hasta el 2050, pasando a ser la primera fuente de energía secundaria que alimente la demanda en ese momento.

En un escenario donde se avanza en la modificación de las estructuras de consumo, denominado escenario de electrificación, la electricidad pasa a ser predominante en el sector residencial, aunque el gas natural sigue representando una porción importante del consumo, y crece ligeramente en la industria y el transporte. No obstante, sigue siendo un escenario completamente insuficiente respecto del objetivo de la carbono neutralidad al 2050.

Para poder descarbonizar por completo los consumos del sector energético y de los distintos sectores de la economía, resultan imprescindibles profundas transformaciones que permitan que la electricidad sustituya completamente a los combustibles fósiles. Sin embargo, la electricidad tiene que ser producida mediante fuentes no emisoras de GEI, de las cuales sobresalen actualmente en términos de participación la hidroelectricidad y la nucleo-electricidad,

privilegiando fuentes de producción que actualmente son minoritarias en el Balance de Energía Eléctrica.

Los objetivos de emisiones netas nulas sólo son compatibles con la electrificación de los usos y la producción de energía eléctrica con medios no emisores de GEI. La electrificación de los usos en transporte y vivienda agregarán demanda sobre la trayectoria tendencial y en los escenarios de electrificación y de eficiencia energética a partir de cambios de conducta, debe ser tenida en cuenta y computada al evaluar los recursos que deben ser puestos en juego.

En el documento de trabajo sobre descarbonización profunda para el sector eléctrico (Rabinovich, Caratori, IAE/ITDT, 2017) se realizó una primera cuantificación con la información disponible al momento de su elaboración que preveía la incorporación de 3.150 MW hidroeléctricos, 1.900 MW nucleares, y 17.000 MW eólicos y solares, hasta el año 2030. En total, la capacidad instalada en base a medios renovables es del orden de los 20.000 MW.

Las proyecciones continúan hasta el año 2050, con el objetivo de que toda la capacidad de generación de energía eléctrica no emita GEI. Entre 2030 y 2050 se incorporaban los proyectos hidroeléctricos binacionales con Brasil y Uruguay (3.100 MW para Argentina) y una nueva central hidroeléctrica cada tres años a partir de 2038, de una capacidad aproximada de 600 MW, hasta completar el recurso hídrico disponible de acuerdo con los inventarios existentes. De esta forma la hidroelectricidad aportaría cerca de 6.000 MW adicionales. Adicionalmente, se agrega una nueva central nuclear cada seis años a partir de 2033 con una capacidad adicional total de 3.000 MW.

Pero para alcanzar el objetivo de tener un parque de generación eléctrico descarbonizado, es decir neutro en emisiones, el rol principal a partir de 2030 lo asumen los emprendimientos eólicos, que según la obra citada deberían incorporar una capacidad de 30.000 MW, y fundamentalmente la energía solar que debería aportar 75.000 MW. En este último caso solamente será posible mediante fuertes incentivos a la generación distribuida, impulsando masivamente la figura de los productores-consumidores.

Este sistema mantiene equipamiento con combustibles fósiles en concepto de reserva y seguridad de abastecimiento, pero con una participación mínima en la matriz de generación eléctrica en 2050.

Con estas cifras, la energía eléctrica ocuparía en el esquema de abastecimiento de energía primaria el 25% del total, lo que hace imprescindible que el 75% restante sea sustituido en los sectores de transporte, viviendas e industria. Ello agregará demanda sobre la producción de electricidad, la que habrá que considerar si requiere la incorporación de medios de producción adicionales, en un escenario de máxima eficiencia energética.

El presente trabajo se basa en dicha cuantificación inicial, realizando estimaciones adicionales y de precisión para los escenarios en los cuales se incrementa la electrificación de los usos finales energéticos en todos los sectores.

En la siguiente Tabla 4 se presentan los resultados para los estados inicial y final del sistema al 2050, vinculados con la electrificación de usos energéticos y la descarbonización de la matriz eléctrica.

Tabla 4: Síntesis de resultados clave de la modelización del estado final del consumo final de energía y generación eléctrica para los tres escenarios de crecimiento del PIB

		Estado inicial 2018	Estado final 2050		
			Bajo	Medio	Alto
Escenarios de crecimiento del PIB			Bajo	Medio	Alto
% de electricidad sobre consumo final		21%	69.9%	69.4%	70.0%
Demanda de energía eléctrica	TWh	133.0	529.7	557.7	644.8
Potencia eléctrica instalada (incluye baterías)	GW	38.5	207.3	214.7	243.8
Incorporaciones anuales de potencia (MM10a)	MW/año	1,130.2	12,117.6	12,828.7	14,750.5
Energía distribuida sobre total	% sobre generación	0%	14%	14%	14%
Incorporación de capacidad de generación termoeléctrica convencional s/total	%	78.8%	37.0%	36.9%	35.5%
Incorporación de capacidad de generación libre de emisiones sobre total	%	21.2%	63.0%	63.1%	64.5%
Inversiones anuales en nueva capacidad	miles millones USD/año	2.02	9.39	9.99	11.53
Porcentaje de generación a partir de combustibles	%	64%	5%	6%	8%
Porcentaje de generación libre de emisiones	%	36%	95%	94%	92%
Participación por fuente en la generación					
Termoeléctrica convencional	%	63.8%	5.1%	5.9%	7.8%
Nuclear	%	4.7%	5.1%	4.9%	4.2%
Gran hidroelectricidad	%	29.1%	9.3%	8.8%	7.6%
Hidroelectricidad <50MW	%	1.0%	0.4%	0.4%	0.4%
Eólica	%	1.0%	35.0%	35.0%	35.0%
Solar Fotovoltaica	%	0.1%	40.0%	40.0%	40.0%
Biomasa y biogás	%	0.3%	5.0%	5.0%	5.0%
Participación por fuente en la potencia instalada					
Termoeléctrica convencional	%	63.7%	27.2%	26.5%	26.6%
Nuclear	%	4.6%	2.6%	2.5%	2.2%
Gran hidroelectricidad	%	28.0%	9.4%	9.1%	8.0%

Hidroelectricidad <50MW	%	1.3%	0.4%	0.4%	0.3%
Eólica	%	1.9%	21.8%	22.2%	22.7%
Solar Fotovoltaica	%	0.5%	36.4%	37.1%	37.9%
Biomasa y biogás	%	0.1%	2.2%	2.2%	2.2%
Almacenamiento (como % de potencia instalada)	%	0.0%	13.4%	13.6%	13.9%
Intensidad de emisiones de GEI*	tCO ₂ e/ GWh	309.4	32.8	37.6	49.8
Reducción de intensidad de emisiones de GEI de generación vs. estado Inicial	%		-89%	-88%	-84%

*En el caso de la intensidad de emisiones de la generación eléctrica para el Estado Final, se presenta como peor escenario el cuantificado suponiendo que la generación termoeléctrica de backup se produce con gas natural. Instancias futuras de este análisis explorarán su sustitución completa por biocombustibles, hidrógeno y almacenamiento de respuesta ultra rápida.

Fuente: Elaboración propia.

Merecen destacarse algunos aspectos que permiten dimensionar, por un lado, la magnitud del esfuerzo requerido para lograr las transformaciones aquí descritas, y por el otro realizar un primer acercamiento a su factibilidad en términos de la experiencia histórica de Argentina.

En primer lugar, se destaca que, en el escenario de máximo crecimiento del PIB, la demanda eléctrica presenta un incremento entre el año base y el horizonte del escenario del 385%, pasando de 133 TWh en 2019 a 644,8 TWh en 2050, lo que implica un crecimiento anual acumulativo de 5,1%, tasa que duplica el crecimiento de la última década. Este incremento de la demanda eléctrica se explica principalmente por el incremento de la penetración de la energía eléctrica en el consumo final de energía, que mientras que en 2018 se encontraba en el orden del 21%, en 2050 alcanzaría bajo este escenario el 70% del consumo final. Adicionalmente, el consumo final total de energía experimentaría un crecimiento del 55%, equivalente a un crecimiento anual acumulativo del 1,4%, lo que implica un desacople del crecimiento de la demanda respecto del PIB.

La demanda de energía eléctrica crecería según este escenario a un ritmo casi 4 veces más rápido que el consumo final total. Cabe señalar respecto de este punto que precisamente es, en gran parte, debido a la mayor electrificación de los consumos que se obtiene una mayor eficiencia del consumo final, principalmente debido a las diferencias de rendimiento tanto de los motores eléctricos como de los equipamientos de bombas de calor para calefacción.

En respuesta a este incremento de la demanda eléctrica, y sumado al hecho de que las fuentes renovables intermitentes de generación eléctrica requieren de respaldo de potencia, la capacidad instalada del parque de generación pasaría en este escenario de 38,5 GW en 2018 a 243,8 GW en 2050, lo que representa un crecimiento equivalente a más que sextuplicar la potencia instalada, a una tasa de crecimiento anual acumulativa del 5,9%, incluyendo baterías y otros tipos de respaldo.

Esto implicaría incorporar al parque un promedio anual de potencia de 14.750 MW durante el período 2041-2050, que contrasta con los 1.130 MW incorporados en promedio anualmente durante el período 2009-2018, es decir que debería incorporarse potencia a un ritmo 12 veces mayor que en el periodo mencionado.

A su vez, en los últimos 10 años del horizonte planteado, el 64,5% de la potencia estaría asociada a fuentes sin combustión, mientras que el 35,5% restante podría utilizar fuentes que aprovechen la combustión como la biomasa, el biogás y los biocombustibles líquidos (y en menor medida hidrógeno), a los que deberá evaluarse la introducción de tecnologías de captura y almacenamiento de carbono que permitan alcanzar emisiones netas nulas o incluso negativas en términos de su ciclo de vida²¹.

Se destaca también en este sentido que a partir del año 2027 las inversiones en generación termoeléctrica (excluyendo nuclear) pasan a representar menos de la mitad de las incorporaciones totales y a realizarse exclusivamente a los fines de proveer respaldo y brindar flexibilidad al sistema, que en la década de 2031 a 2040 estas incorporaciones equivalen a menos del 20%, y que de 2040 en adelante desaparecen, observándose incluso retiros de potencia termoeléctrica.

En términos de generación, mientras que en la década precedente a 2018 el 36% de la generación eléctrica de Argentina provenía de fuentes libres de emisiones, con el restante 64% proveniente del uso de combustibles fósiles, en la década entre 2041 y 2050 para el escenario descrito el 92% de la generación sería libre de combustión mientras que el resto, como se señaló, podría provenir de biocombustibles o hidrógeno.

Como resultado de este cambio, la intensidad de GEI de la generación eléctrica disminuiría de 309,4 tCO₂e/GWh a 49,8 tCO₂e/GWh, lo que representa una reducción de la intensidad del 84%, computada de manera pesimista (considerando que la combustión remanente se realiza sobre la base de gas natural).

Una rápida estimación asociada a los requerimientos de capacidad arroja inversiones del orden de los 6 mil millones de dólares por año hasta el 2030, de los cuales el 50% corresponde a centrales eólicas y solares²². Pero a partir de entonces y hasta el 2050, considerando una caída del costo unitario de las energías renovables no convencionales, las inversiones anuales promedio podrían alcanzar los 8.250 millones de dólares por año, de las cuales dos tercios corresponden a centrales eólicas, solares y generación distribuida en base a energías renovables.

²¹ Al respecto, ver Carlino, H, Carlino, M y otros: Impactos de los CDR en los ODS en LAC.

²² Para evaluar la capacidad a incorporar en materia de energía eólica y solar, en el trabajo citado se estimó en primer lugar la energía que aportan estos medios de producción, y luego se estimó un rendimiento del 45% para las centrales eólicas, y un 25% para los equipos fotovoltaicos.

Estas inversiones no tienen en cuenta las requeridas en los sistemas de transmisión y distribución, que deben acompañar los cambios propuestos.

Electromovilidad y sustitución de combustibles

En la electromovilidad juega un papel principal el automóvil eléctrico (EV) y lo que su introducción implica en materia de construcción de infraestructura de carga, redes eléctricas y almacenamiento de electricidad. No solo el automóvil eléctrico forma parte de las acciones necesarias, sino que en ese conjunto también se integran el transporte urbano de pasajeros a través de ferrocarriles y buses eléctricos para la media distancia, y los cambios de hábito y modalidades para el desplazamiento de corta distancia, en bicicletas, monopatines, scooters y el uso del transporte como servicio (TaS), el compartir vehículo, etc.

La electrificación del transporte urbano es una de las acciones estratégicas en el contexto de la descarbonización de los usos.

La mayoría de los vehículos del parque automotor liviano deberán convertirse a energía eléctrica. Este crecimiento debe ir acompañado por la infraestructura necesaria para la carga de vehículo, con sus implicancias aguas arriba de los cargadores en las redes de transporte y distribución, y la reducción del costo de las baterías (Japón, 100 USD/kWh en 2030).

En el escenario de electrificación, se proyecta que para el año 2030:

- El 30% de las ventas de autos livianos sean eléctricos.
- 50% de las ventas de buses de corta distancia sean eléctricos.
- El 30% de los vehículos nafteros cuenten con tecnología flex.
- Corte efectivo de bioetanol: 16% (12% obligatorio).
- El 12% de las ventas de autos y livianos sean eléctricos.
- 8 mil buses de corta distancia sean B100.
- Corte efectivo de biodiesel: 11,5% (10% obligatorio).
- 50% de las ventas de buses de corta distancia sean a GNC.
- La participación de los vehículos a GNC se eleve al 22% (desde el 12% en 2018).
- 25% de las ventas de vehículos pesados (excepto buses) sean propulsadas a GNL.

En la siguiente Tabla 5 se presentan los resultados para los estados inicial y final del sistema al 2050, vinculados con la electrificación de vehículos livianos.

Tabla 5: Síntesis de resultados clave de la modelización del estado final del sistema de vehículos livianos para los tres escenarios de crecimiento del PIB

	Estado inicial 2018	Estado final 2050

Escenarios de crecimiento del PIB		Bajo	Medio	Alto
Parque automotor liviano (Millones)	13.03	22.42	24.69	30.21
Ventas anuales de vehículos livianos (miles)	0.68	1.73	1.99	2.65
Vehículos livianos cada 1000 hab.	296	403	444	543
Porcentaje de ventas de vehículos eléctricos sobre parque de livianos	0%	96%	96%	96%
Porcentaje de vehículos eléctricos sobre parque de livianos	0%	73%	75%	78%
Porcentaje de vehículos con MCI sobre parque de livianos	100%	27%	25%	22%
Porcentaje de energía consumida por EV sobre livianos	0%	60%	62%	66%
Porcentaje de energía consumida por MCI sobre livianos	100%	40%	38%	34%
MW medios de demanda eléctrica adicionados por la política	0%	11,579	13,059	16,658

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados modelizados muestran que el parque de vehículos livianos urbanos en el escenario medio casi se duplica, llegando a los 25 millones de automóviles, con un porcentaje de ventas de EV en 2050 sobre el total del 96%, y una penetración en el parque del 75% de EV. De esta forma, el 62% de la energía que consume el segmento de vehículos livianos será electricidad, y el 38% combustibles fósiles con balance neto cero de emisiones (biocombustibles, hidrógeno). **La demanda sobre el sector de generación eléctrica va a requerir la incorporación de 13.000 MW para abastecer el sistema de transporte**, más allá de la demanda que el sistema va a requerir para otros usos.

Eficiencia energética

La mayor parte de los escenarios futuros y de los diálogos realizados en el marco de este Proyecto con los actores involucrados muestran que la eficiencia energética es un supuesto subestimado en la Argentina, quedando limitado a la ejecución de una serie de acciones, con tecnologías disponibles hoy en el mercado sin considerar innovaciones y rupturas que podrían modificar la forma en la que se consume la energía, respecto de una política integral que permita alcanzar objetivos más ambiciosos. Dada la multiplicidad de actores (consumidores, productores, empresas de servicios), las decisiones son más de carácter descentralizado y privado que el resultado de una política desde el Estado. Sin embargo, éste en sus distintos niveles es el encargado de orientar y favorecer los incentivos para que la toma de este tipo de decisiones se oriente hacia los objetivos buscados.

La intensidad energética, medida como la relación entre el abastecimiento de energía primaria y el Producto Bruto Interno (PBI), es un indicador del esfuerzo que realiza un país por mejorar la productividad de su consumo energético. En la Argentina, este indicador ha tenido un comportamiento muy errático como consecuencia de la evolución del PBI, pero también evidenciando las falencias en la implementación de políticas de Uso Racional y Eficiencia Energética (UREE), que revelan un alto potencial de ahorro a ser aprovechado.

Diversos estudios indican que es posible plantear hipótesis de mejora de la intensidad energética de entre el 40% y el 55% o aún mayores. Es posible proponer una trayectoria general del sistema energético con un componente de UREE que supone un nivel de reducción de la intensidad energética del 1,5% anual lineal, lo cual acumula, en un lapso de 30 años, una disminución del 45% respecto al año base 2021, en línea con la experiencia internacional. Esta reducción significa un piso posible que podría ser superado, dado que la Argentina ha hecho relativamente poco en el tema y existe mucho margen de mejora.

Las medidas de mitigación coinciden con las mejoras de eficiencia energética y ahorro planteados, por lo que hay un amplio consenso en aquellas acciones a emprender, entre las que podemos citar:

1. **En materia de eficiencia energética:** Utilización de artefactos más eficientes, promoviendo tecnologías de menor consumo; sustitución de consumos de combustibles por energía eléctrica, aumentando la eficiencia de conversión final; planificación integrada del medio ambiente; recursos, salud y bienestar en ciudades; redes y modos de transporte; diseño de edificios y residencias; procesos industriales; sistemas de iluminación; etc., con formación de técnicos y profesionales con alta capacitación en temas de sostenibilidad.
2. **En materia de uso responsable de la energía:** mejoras en los comportamientos, hábitos y costumbres generando conciencia ambiental, promoviendo la educación y la formación técnica y profesional y, desalentando consumos suntuarios o de bienes y servicios con alto contenido de carbono.

En los escenarios energéticos al 2030²³ publicados en 2019 por la Secretaría de Energía (SE), el consumo de energía final en un escenario de eficiencia energética crecería a una tasa del 1,4% anual acumulado, contra un escenario base casi 60% mayor. Partiendo de un Consumo de Energía Final en 2018 de 53,2 Mtep se llegaría en un escenario eficiente a 63,1 Mtep, ahorrándose 5,8 Mtep respecto del escenario base con una elasticidad implícita de 0,47, es decir que por cada punto de crecimiento del PIB el consumo de la energía final debe crecer medio punto.

El escenario eficiente recoge acciones que forman parte del Plan Nacional de Energía y Cambio Climático:

- Eficiencia en electro y gasodomésticos;
- Incremento del uso de LED en el parque de iluminación;
- Bombas de calor, desplazando calefactores a gas natural;
- Alumbrado público: recambio completo progresivo de luminarias públicas al año 2030,
- Optimización de energía en la Industria;
- Cogeneración;
- Eficiencia en calefones y termotanques;
- Transporte urbano e interurbano;
- Recuperación del sistema ferroviario, transporte urbano sustentable,
- Etiquetado vehicular asociado a la definición de estándares mínimos de eficiencia energética.
- Promoción de nuevas tecnologías y resto de acciones.

Sin embargo, en este escenario eficiente cambia muy poco la estructura de consumo en 2030, manteniéndose el gas natural como la fuente de mayor preponderancia en el sector residencial e industrial, 57% y 42% respectivamente; los combustibles líquidos en el transporte mantienen una participación cercana al 70%, mientras que el gas natural avanza al 21% y la energía eléctrica crece marginalmente en la industria y el sector residencial y es casi imperceptible en el transporte.

Este escenario eficiente es muy ambicioso en términos de acciones a llevar a cabo para poder concretarlo, pero se encuentra muy lejos de posibilitar que en 2050 Argentina pueda alcanzar emisiones netas cero que comprometió ante la comunidad internacional. En este sentido es necesario avanzar con metas más ambiciosas al 2030 y 2040 para llegar con posibilidades de estar cerca de este objetivo al 2050.

Si en un escenario poco ambicioso como el descrito anteriormente, donde los combustibles fósiles siguen predominando ampliamente en la estructura de consumo final se consiguieran realizar ahorros por 5,8 millones de Tep en 2030, es decir aproximadamente 41,8 millones de barriles y estimando un precio promedio en ese momento de 60 USD/barril, el ahorro se estima en una suma de 2.500 millones de USD que permitiría promover acciones de eficiencia y ahorro energético. Claramente, esta disponibilidad de financiamiento crece con las ambiciones de ahorro y eficiencia que podrían ser derivadas por distintos mecanismos a una nueva industria de eficiencia direccionada al sector residencial, al comercial, al transporte y a la industria.

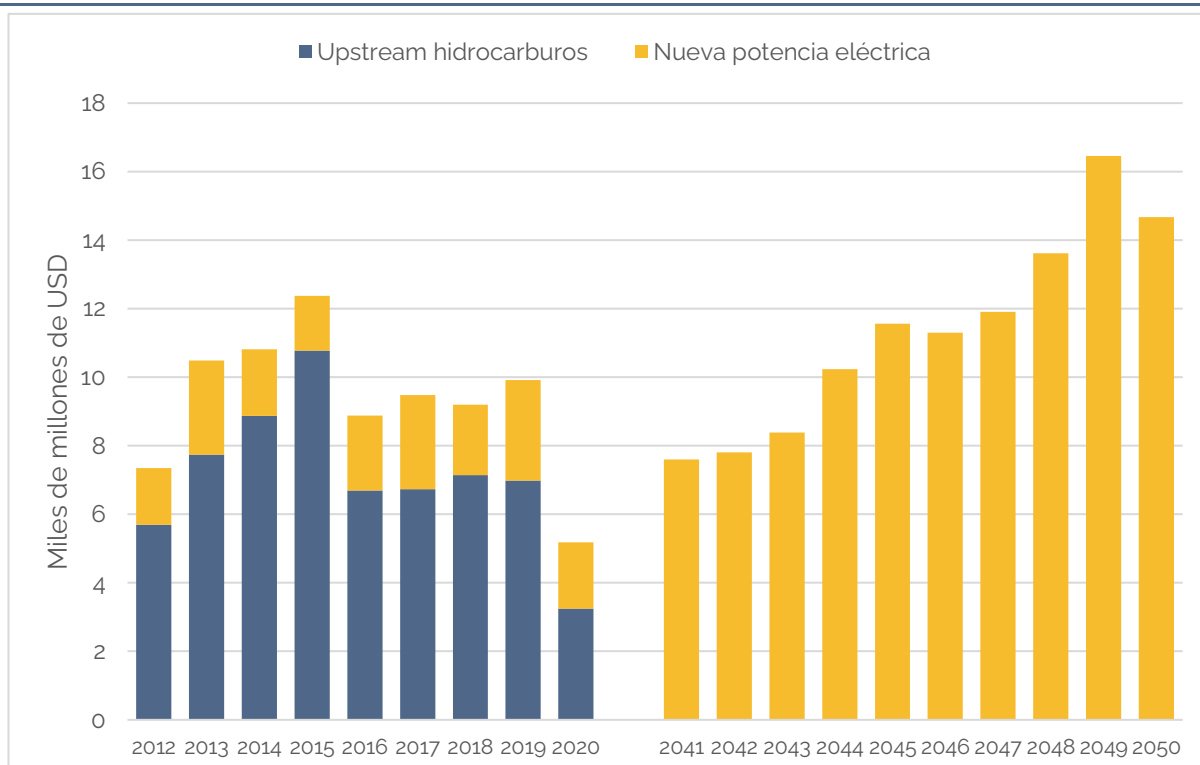
El potencial de la eficiencia energética es significativo para alcanzar los objetivos de emisiones netas cero, pero para poder desarrollarlo, la creación de un mercado de empresas de servicios energéticos (ESE) en la Argentina es indispensable.

Consideraciones preliminares sobre requerimientos de inversión

El correlato de los requerimientos físicos asociados a la descarbonización de la generación de energía eléctrica es un notable incremento en los montos de inversión en nueva capacidad instalada, que a los fines de esta primera aproximación excluyen las inversiones requeridas en expansiones del sistema de transmisión eléctrica, que serían muy significativas. Según el escenario de máximo crecimiento, **la instalación de nueva potencia requeriría hasta un promedio anual en la última década del período de estimación de 11,5 mil millones de USD, que contrastan con el promedio aproximado de 2 mil millones de USD invertidos anualmente durante los diez años previos al año base** (período en que se incluye este último). Esto representa un incremento de casi 6 veces las inversiones de dicho período, que podría resultar menor si los costos de inversión por unidad de potencia instalada continúan una trayectoria decreciente como la que se observa hasta la fecha.

No obstante, a los fines de brindar una comparación con las inversiones de los años precedentes, la Figura 3 muestra a la izquierda las inversiones realizadas en el período 2012-2020 en el upstream hidrocarburífero y en nueva capacidad de generación eléctrica, y a la derecha las inversiones en nueva potencia eléctrica estimadas de manera expeditiva para este escenario.

Figura 3: Inversiones en el upstream hidrocarburífero y en nueva capacidad de generación eléctrica



Fuente: Elaboración propia sobre la base de los escenarios realizados y de las inversiones históricas en upstream Res 2.057/2005

Como puede observarse, en promedio, en el período 2012-2020 las inversiones en upstream de hidrocarburos alcanzaron los 7,1 mil millones de USD, que sumados a los 2,02 mil millones de USD de nueva potencia eléctrica totalizan 9,12 mil millones de USD anuales. Al contrastar este valor con los 11,53 mil millones de USD requeridos en promedio para la última década de estos escenarios, se observa que el orden de magnitud de las inversiones requeridas anualmente (en promedio) es del mismo orden, encontrándose 26% por encima de aquel, pero creciendo aceleradamente hacia los últimos años, en la medida en la que se electrifican más consumos.

A su vez, y estrictamente a los fines ilustrativos, cabe destacar que los subsidios (a los que aquí nos referimos como transferencias para gastos corrientes) se encuentran en promedio en la última década en el orden de los 9,87 mil millones de USD anuales, de los cuales aproximadamente el 35% corresponde a combustibles fósiles, de lo que se desprenden al menos dos cuestiones relevantes:

- en primer lugar, que las transferencias para gastos corrientes actualmente erogadas por el Estado Nacional para subsidiar la energía se encuentran en el orden de aproximación expeditiva de las inversiones en nueva generación en la década de 2041-2050 (y la exceden para las décadas previas);
- en segundo lugar, que resulta de alta relevancia conocer el impacto de estas nuevas políticas en el costo medio del sistema, pues de ello dependerá también la capacidad de la demanda de pagar por el costo económico de la provisión de la energía, como también de su asequibilidad y eventuales costos fiscales.

Dichos escenarios de costo deberán naturalmente ser contrastados con sus contrapartes termoeléctricas, pero siempre computando un precio al carbono bajo diferentes escenarios en el horizonte de análisis.

2. AFOLU

Se realiza a continuación un primer abordaje al análisis de factibilidad de los tres conjuntos de opciones de mitigación priorizados para la descarbonización del sector AFOLU: Cultivos agrícolas; Sistemas ganaderos; y Bosques cultivados.

Configuración de escenarios

La presente evaluación preliminar de factibilidad para la implementación de los conjuntos priorizados ha sido estructurada metodológicamente en dos escenarios, que serán evaluados respecto del escenario de línea de base. Estos escenarios tienen en cuenta las siguientes hipótesis:

- **Escenario de línea de base** (*business as usual* o BAU), producción del sector y emisiones asociadas siguen las tendencias históricas;
- **Escenario alto**: implementación de medidas de mitigación en agricultura y ganadería e incremento de la superficie forestada es de 60.000 ha/año
- **Escenario carbono neutralidad**: Considerando el compromiso de carbono neutralidad al año 2050 asumido por la Argentina, se analizó un escenario de "emisión cero" para el sector AFOLU, considerando el efecto del incremento del área forestada, por ser la medida de mitigación más significativa para el sector y el resto de las medidas de mitigación mantienen mismos supuestos.

El objetivo del presente análisis es realizar una cuantificación del área necesaria de bosques implantados en Argentina para compensar las emisiones provenientes de suelos agrícolas (residuos y fertilizantes), ganadería (fermentación entérica y excretas) y cambio de uso del suelo (deforestación y cambio del stock de carbono en el suelo), en el escenario de aumento significativo de la superficie implantada (escenario alto) y en el de manera de alcanzar la carbono neutralidad al 2050 del sector.

Esta estimación fue realizada en base a la implantación de pinos, eucaliptus y salicáceas, por ser especies que cuentan con mayores tasas de crecimiento, genética y un potencial de industrialización más cercano²⁴.

Una estimación posterior podría realizarse considerando la forestación con especies nativas, las cuales presentan tasas de crecimiento inferiores, demandando por lo tanto un área mayor de implantación. Como complemento puede también analizarse la recuperación de áreas de bosque nativo degradadas mediante el enriquecimiento con especies nativas, lo cual es un proceso más complejo de sucesión ecológica de la flora.

Además de generar capturas de carbono y mitigar el cambio climático, la expansión del sector forestal trae aparejadas múltiples ventajas como el crecimiento del empleo en todo el territorio nacional, el desarrollo de nuevas cuencas forestales, cambios de hábito en el consumo de bienes

²⁴ Una segunda estimación podría también haberse realizado considerando la forestación con especies nativas, las cuales presentan tasas de crecimiento inferiores, demandando por lo tanto un área mayor de implantación. Como complemento puede también analizarse la recuperación de áreas de bosque nativo degradadas mediante el enriquecimiento con especies nativas, lo cual es un proceso más complejo de sucesión ecológica de la flora.

maderables (vivienda, muebles y combustible). El sector forestal integra una cadena que abarca la producción primaria, la industria y los servicios asociados.

Para el escenario BAU, se estimaron las emisiones del sector AFOLU para el período 2020 al 2050 a partir del 2016. Para la proyección 2017-2050 de la línea de base en cultivos agrícolas y ganadería se utilizaron criterios de crecimiento esperado y emisiones asociadas. La tasa de deforestación se consideró uniforme del 2016 en adelante (155.000 ha/año) como así también el cambio en el stock de carbono en el suelo.

El incremento necesario del área forestal se estimó en base a una tasa de crecimiento anual de bosques implantados surgida del promedio ponderado de las tasas de crecimiento y factores de conversión y expansión (BCEFi) de coníferas, eucaliptus y salicáceas según el inventario actual de GEI de la Argentina (Tabla 6 y Tabla 7).

Tabla 6: Tasas de crecimiento por especie y provincia

Incremento anual neto promedio para un tipo de vegetación específica (lv) (m ³ /ha/año)					
Provincia	Coníferas	Eucalipto	Salicáceas	Otras	Promedio
Buenos Aires	20,00	30,73	21,50	20,00	23,06
Catamarca	20,00	40,00	23,00	20,00	25,75
Chaco	20,00	20,00	23,00	5,00	17,00
Chubut	19,50	40,00	23,00	18,00	25,12
Córdoba	20,28	25,00	24,97	14,50	21,19
Corrientes	22,08	35,00	23,00	14,80	23,72
Entre Ríos	23,84	32,00	20,59	14,50	22,73
Formosa	20,00	20,00	23,00	14,50	19,38
Jujuy	30,00	28,63	23,00	15,53	24,29
La Pampa	20,00	22,00	23,00	18,00	20,75
La Rioja	20,00	40,00	23,00	18,00	25,25
Mendoza	20,00	40,00	23,00	18,00	25,25
Misiones	30,00	35,00	21,47	16,55	25,76
Neuquén	19,53	40,00	23,00	16,50	24,76
Río Negro	19,50	40,00	23,00	18,00	25,13
Salta	22,83	27,50	23,00	15,53	22,21
San Juan		22,00	23,00	18,00	21,00
San Luis	20,00	40,00	23,00	15,00	24,50
Santa Cruz	19,50		21,50		20,50
Santa Fe	25,00	21,25	21,50	14,50	20,56
Santiago del Estero		40,00	23,00	18,00	27,00
Tucumán	25,00	30,00	23,00	15,85	23,46
Grand Total	21,85	31,86	22,71	16,13	23,15

Fuente: BUR 3

Se asumió un crecimiento del área forestada regional manteniendo las proporciones actuales de las distintas cuencas forestales sobre el total nacional. Este supuesto asume que la expansión del área forestal comenzaría en forma radial en torno a los centros de consumo y procesamiento para ir gradualmente creciendo a zonas más alejadas o nuevos centros de procesamiento.

Tabla 7: Factores de conversión y expansión por especie y provincia

Factor de conversión y expansión de biomasa BCEFI en crecimiento (ton biomasa/m3 de madera)					
Provincia	Coníferas	Eucalipto	Salicácea	Otras	Promedio
Buenos Aires	0,67	0,60	0,60	0,48	0,59
Catamarca	0,69	0,48	0,60	0,48	0,56
Chaco	0,54	0,66	0,66	0,66	0,63
Chubut	0,60	0,48	0,60	0,48	0,54
Córdoba	0,67	0,60	0,60	0,60	0,62
Corrientes	0,54	0,66	0,66	0,66	0,63
Entre Ríos	0,69	0,60	0,60	0,60	0,62
Formosa	0,54	0,66	0,66	0,66	0,63
Jujuy	0,69	0,60	0,60	0,60	0,62
La Pampa	0,67	0,60	0,48	0,48	0,56
La Rioja	0,69	0,48	0,60	0,48	0,56
Mendoza	0,69	0,48	0,60	0,48	0,56
Misiones	0,54	0,66	0,66	0,66	0,63
Neuquén	0,60	0,48	0,60	0,48	0,54
Río Negro	0,60	0,48	0,60	0,48	0,54
Salta	0,54	0,66	0,66	0,66	0,63
San Juan		0,60	0,60	0,48	0,56
San Luis	0,67	0,48	0,60	0,60	0,59
Santa Cruz	0,69		0,60		0,65
Santa Fe	0,69	0,60	0,60	0,60	0,62
Santiago del Estero		0,48	0,60	0,48	0,52
Tucumán	0,69	0,60	0,60	0,60	0,62
Grand Total	0,64	0,57	0,61	0,56	0,59

Fuente: BUR3

Por otra parte, se analizan las medidas que reducen la intensidad de carbono por unidad de producto y se consideran escenarios según el grado de adopción de tecnologías PGPR y de prácticas de extracción del rodeo bovino de carne:

- **Escenario alto:** adopciones graduales que llegarían al 100% al 2050 de PGPR (aumentan la productividad sin incrementar el uso de fertilizantes) e indicadores de eficiencia alcanzan un 80% en la relación ternero - vaca (15% más que el año base) y del peso medio de faena hasta 245 kg eqRcH (15% más que el año base).
- **Escenario medio:** adopciones graduales que llegarían al 70% al 2050 de PGPR (aumentan la productividad sin incrementar el uso de fertilizantes) y genera la eficiencia en la producción mejorando la relación ternero - vaca hasta un 73% (10% más que el año base 2016). Asimismo, se aumenta la producción de carne por el aumento del peso medio de faena hasta 235 kg eqRcH (10% más que el año base).
- **Escenario bajo (BAU):** adopciones graduales que llegarían al 30% al 2050 de PGPR (aumentan la productividad sin incrementar el uso de fertilizantes) y escenario típico en Argentina, que sólo incrementa levemente el stock de vientres (8%) como variable financiera de resguardo. No se producirían cambios en eficiencias.

Principales resultados de la modelización

A partir del análisis realizado en torno a las medidas de mitigación para los sectores cultivos agrícolas, ganadería bovina y sector Forestal, se puede concluir que la meta de máxima sería alcanzar la carbono neutralidad al año 2050, implementando todas las medidas de mitigación identificadas. Tanto aquellas que reducen las emisiones totales como las que reducen las intensidades de emisión.

Se ha identificado a la forestación como la medida que mayor impacto tiene, pero también existen barreras para alcanzar los niveles buscados de área forestada al 2050. La fijación de CO₂ por crecimiento forestal es muy eficiente, pero debe considerarse su aprovechamiento y turnos de corte que varían según la especie, la región y el destino de uso. El secuestro de carbono en el suelo tiene un potencial significativo, pero es también complejo de alcanzar. El resto de las medidas son de menor impacto, pero no por eso menos importantes, ya que no sólo son compatibles con la mejora de los sistemas de producción y su sostenibilidad, sino también con el crecimiento económico del sector en muchas de las regiones del país.

De cara al 2050, el escenario más ambicioso en términos de reducción de emisiones totales, y apuntando a la carbono-neutralidad, consistiría en la necesidad de implementar lo siguiente:

- Aumentar en 8 millones de hectáreas el área forestada.
- Adopción al 100% de la urea "no volátil".
- Aplicación de Biochar (pellets al 50%) en el 60% de la superficie frutícola.
- Desarrollo y consolidación de prácticas de manejo y conservación, adaptadas a cada región, en ganadería y agricultura, que permitan pasar de una reducción en las emisiones a un incremento en los niveles de secuestro de carbono. En agricultura, buscando la máxima producción de biomasa y la mayor ocupación con gramíneas en los ciclos agrícolas (rotaciones). En ganadería, mediante sistemas de pastoreo y mejoramiento forrajero. Esto último está estrechamente relacionado con la mejora en los índices reproductivos y la reducción de intensidad de emisiones.

Atendiendo estas circunstancias, la estrategia de descarbonización para el sector AFOLU consiste en tres pilares:

- Incrementar el secuestro y stock de carbono
 - Incrementar Stock de carbono en suelo en tierras agrícolas y de pastoreo
 - Bosques Cultivados: Incrementar el área forestada
 - Bosques Nativos: Planes de Manejo y control de la deforestación ilegal
 - Recuperación Tierras degradadas

- Incrementar la eficiencia en la producción. Esto se planifica mediante reducir la intensidad de emisiones en ganadería y cultivos agrícolas
- Implementar prácticas y procesos que reducen emisiones, a través de:
 - Rotación de cultivos/ cobertura de suelos
 - Uso de fertilizantes nitrogenados
 - Sistemas silvo-pastoriles
 - Generación de Bioenergía a partir de excretas /biomasa
 - Reducir quema de biomasa

A continuación, se describen los escenarios de descarbonización del sector en función de los conjuntos de mitigación priorizados y que su implementación contribuye a alcanzar los pilares de la descarbonización del sector AFOLU identificados previamente.

Cultivos agrícolas

En la categoría suelos agrícolas las emisiones de GEI provienen de tres fuentes principales:

- residuos de cosecha,
- fertilizantes sintéticos, y
- carbono del suelo.

Las acciones de mitigación aquí propuestas están interrelacionadas y procuran minimizar las emisiones de carbono en el suelo mediante la mayor producción anual de carbono de la biomasa vegetal. Esto está directamente relacionado con las secuencias de cultivos (rotaciones), la presencia de gramíneas en la rotación, tanto como cultivos de cosecha como de cobertura (o cultivo de servicios).

En primer lugar, se consideran las medidas asociadas al contenido de **carbono en suelos** que incluye las rotaciones de cultivos, que determinan las emisiones o capturas de carbono en el suelo. El secuestro de carbono en suelos se encuentra relacionado con el tipo de suelo, el clima y la producción anual de biomasa y el sistema de labranza. La producción anual de biomasa depende del rendimiento de los cultivos y el tipo de cultivo. La participación de cereales en la rotación es de suma importancia en el balance de carbono de un suelo agrícola. La siembra directa y la intensificación por uso de fertilizantes e inclusión de dobles cultivos y/o cultivos de cobertura, favorece el aporte de carbono, dando lugar a balances "menos negativos", neutros o positivos. No obstante, no todas las regiones responden de la misma manera a estas prácticas.

Por otra parte, se incluye la aplicación de **biocarbón o biochar**. La estimación de escenarios de adopción de Biochar y sus costos han sido evaluada en forma individual debido a la complejidad de su implementación debido a que implica condiciones para su producción además de su posterior aplicación como enmienda.

Al momento, no hay ningún proyecto de biocarbón a gran escala implementado ni proyectos planificados a desarrollar en Argentina. En Argentina, en el sector agropecuario, el biocarbón tendría como uso principal la aplicación en suelos degradados por un alto número de laboreos, como los cultivos hortícolas intensivos, y suelos no degradados de producción intensiva de frutales. Asimismo, su uso podría extenderse a grandes superficies de suelos degradados de uso agrícola o ganadero. En estos últimos, el uso del biocarbón podría ser más restringido debido a la relación costo-beneficio. A los efectos de la estimación, sólo se considerará la zona de frutales para la potencial implantación del biocarbón a gran escala.

El uso de **tecnologías PGPR** permitiría incrementar la biomasa vegetal sin generar emisiones adicionales, lo cual tendría un efecto positivo sobre el balance de carbono en el suelo y una disminución de la intensidad de emisiones por unidad de producto.

Por último, el uso de fertilizantes nitrogenados genera emisiones que pueden ser en gran parte reducidas mediante el **uso de inhibidores de la volatilización de la urea**. Esta tecnología permite aumentar los rendimientos mediante un uso creciente de fertilizantes obteniendo mayor biomasa vegetal, sin generar un aumento proporcional de las emisiones.

En la Tabla 8 a continuación se detalla la captura de carbono a partir de la implementación de las medidas descritas anteriormente como parte de los cultivos agrícolas.

Tabla 8: Captura de carbono a partir de implementación de medidas de cultivos agrícolas

Medidas	Escenario alto/carbono neutralidad	
	Promedio MtCO ₂ e/año	Acumulado al 2050 MtCO ₂ e
Inhibidores Volatilización Urea	0.31	9.2
Carbono Suelos Agrícolas y ganaderos	16.70	501.0
Carbono en Suelo- aplicación de Biochar	1.36	40.8
Reducción de emisiones Totales	18.37	551.0

Fuente: Elaboración propia

En relación las medidas de reducción en la **intensidad de emisiones**, se identificó en agricultura el uso de tecnologías PGPR en agricultura. Este grupo de medidas son relevantes ya que permiten incrementar la producción sin incrementar la superficie o el uso de fertilizantes.

A continuación, la Tabla 10 se muestra el potencial de reducción de la intensidad de emisiones de la implementación.

Tabla 9: Potencial de reducción en la intensidad de emisiones (emisiones por unidad de producto) para cultivos agrícolas por uso de PGPR

Intensidad 2050		Año Base	Escenarios		
Medidas	Unidades	BAU	Alto	Medio	Bajo
Tecnologías PGPR	MtCo2e/tn	123.56	115.26	117.65	120.95

Fuente: Elaboración propia

Sistemas ganaderos

Argentina es un país en desarrollo y las expectativas de crecimiento de la ganadería son muy buenas en el mediano plazo (2030), como en el largo plazo al 2050. Siendo que las emisiones son directamente proporcionales al stock ganadero, y suponiendo que este crecerá, las emisiones lo harán también.

En la actividad de ganadería bovina de carne se cuantifican las emisiones en valores absolutos (Gg CO_{2eq}) aplicando la metodología de reporte del IPCC 2006.

Los países con ganaderías en desarrollo impulsan la validación ante los organismos internacionales del indicador de intensidad de emisión (t CO_{2eq} /kg Rch). Este indicador relaciona la emisión absoluta de GEI debido a la actividad (Gg CO_{2eq}) por unidad producida de carne (t eq Rch). Da cuenta de la eficiencia del proceso productivo en relación con la cantidad de emisiones totales producidas por la producción bovina de carne para obtener la unidad de producto. A continuación, se expresa la forma de obtenerlo:

$$\text{Intensidad de Emisión } i = \frac{\text{Emisiones}_i (\text{t CO}_2 \text{eq})}{\text{Producción}_i (\text{t eq Rch})}$$

Dónde:

Emisiones_i: total de emisiones generadas por el stock de bovinos de carne para el año *i* expresado en t CO_{2eq}

Producción_i: producción de carne para el año *i*.
i: año para el cual se calcula el indicador

Respecto de la reducción de "Intensidad de Emisiones" se reduce mediante el aumento de tasa de extracción (TE) del rodeo nacional (Peso medio de faena y tasa destete).

Por otra parte, se incluye la estimación del impacto relativo de la implementación de Biodigestores (u otras técnicas) en la Gestión del Estiércol en sistemas ganaderos intensivos.

En lo que respecta a los sistemas bovinos de leche, la gestión de excretas representa el 0,44% de las emisiones del sector AFOLU. Las barreras de implementación llevan una baja adopción de biodigestores como alternativa de generación eléctrica y mitigación. Argentina cuenta con una

ley para la generación de energía distribuida, sin embargo, solo algunas provincias se han adherido. También las altas inversiones son barreras de inserción, pero no solo por el capital del sistema biodigestor, sino incluyendo al sistema productivo que no cuenta con las instalaciones necesarias para la gestión del estiércol con la calidad necesaria para su digestión anaeróbica incrementando los montos.

Por otra parte, el aprovechamiento del metano (CH₄) para producción de energía mitiga en una proporción los GEI (2,9g Mt CO₂e). El sistema de transformación tiene como subproducto al biol que se deberá aportar como enmienda (reemplazo de fertilizantes sintéticos) a los suelos de cultivos agrícolas.

En relación a las medidas de reducción en la **intensidad de emisiones**, se identificó la mejora en la tasa de extracción del rodeo, lo que apuntan a aumentar la producción de carne sin incrementar el stock de vientres, generando un incremento leve en las emisiones de metano, pero logrando una reducción más que proporcional en las emisiones por unidad de producto (kg CO₂eq/kg RcH). A continuación, la Tabla 10 se muestra el potencial de reducción de la intensidad de emisiones de la implementación.

Tabla 10: Potencial de reducción en la intensidad de emisiones (emisiones por unidad de producto) para cultivos agrícolas por uso de PGPR y mejoras en la productividad en sistemas ganaderos

Intensidad 2050		Año Base	Escenarios		
Medidas	Unidades	BAU	Alto	Medio	Bajo
Tecnologías PGPR	MtCo ₂ e/tn	123.56	120.95	117.65	115.26
Sistemas Ganaderos -kg	kg CO ₂ eq/kg RcH,	24.30	19.30	21.00	24.20

Fuente: Elaboración propia

La posibilidad de ocurrencia del escenario alto para los sistemas ganaderos es muy ambiciosa, los objetivos productivos son altamente exigentes y serían necesarios no solo cambios políticos estructurales sino también acompañados por cambios en los sistemas de producción.

En Argentina, con una deuda pendiente en la sostenibilidad de los suelos y en el aporte de nutrientes (reciclado) por llevar históricamente producciones con extracción, pareciera de mayor factibilidad de implementación, por la seguridad y los requerimientos de inversión, el uso agronómico de las excretas y purines. Son prácticas que no requieren de grandes inversiones y al productor le resultan culturalmente más fáciles de gestionar y la gestión siempre es tranqueras adentro, no depende de ningún mercado de precios.

Bosques cultivados

En esta categoría se incluyen tres elementos que están relacionados a la captura de carbono por incremento anual de la biomasa forestal:

- La más significativa corresponde al aumento anual del área forestada.
- En segundo lugar, aunque en menor proporción, el incremento de las tasas anuales de crecimiento por mejora genética de las especies implantadas.
- Por último, la captura de carbono en productos de madera recolectada (PMR). Esto último es relevante con relación a los incentivos al tipo de demanda por parte de la industria (celulosa, mueblería, construcción y otros productos de madera). La categoría PMR no ha sido incluida en los inventarios GEI ni en las proyecciones para el sector forestal, sobrestimando las emisiones por extracciones y cortes del sector forestal.

En Argentina hay 53 millones de hectáreas de bosque nativo, aproximadamente el 6% de la superficie forestal de Sudamérica. El bosque nativo se concentra en el sector centro-norte del país, abarcando las provincias de Formosa, Chaco, Tucumán, Santiago del Estero, Córdoba, Santa Fe, Misiones, Corrientes, La Pampa, Río Negro, Neuquén, Mendoza, San Juan, San Luis y Catamarca.

Figura 4: Principales regiones de Bosques Nativos en Argentina



Fuente: Regiones forestales de Argentina. Archivo de la Secretaría de Medio Ambiente de la Nación

Varias entidades han realizado diferentes estimaciones sobre el potencial de las plantaciones forestales en Argentina, entre ellas

- 5 millones de hectáreas (SENASA)
- 18 y 20 millones de hectáreas de tierras con aptitud forestal, de las cuales 5 millones no compiten en uso con otras actividades agrícolas alternativas (FAO, 2001)
- 15 millones de hectáreas de áreas con potencial endoenergético (FAO, 2020)

Además, el plan nacional ForestAr 2030 establece el objetivo de aumentar la superficie forestal cultivada en Argentina de los 1,3 millones de hectáreas actuales a 2,0 millones de hectáreas para el año 2030. La piedra angular de ForestAr 2030 es la comprensión de que los bosques ofrecen la mayor "solución climática natural" a través de la conservación, la restauración y la mejora de las técnicas de gestión de la tierra que aumentan el almacenamiento de carbono o evitan las emisiones de gases de efecto invernadero en los paisajes de todo el mundo.

La incorporación de genética por medio del uso de clones permitiría también incrementar la captura de carbono. Al incremento en la superficie forestada se le adicionarían los incrementos futuros en la tasa de crecimiento por mejora genética.

En las últimas décadas, los programas de mejoramiento genético forestal en la Argentina, y en el mundo, han pasado a convertirse en un componente esencial a la hora de lograr grandes avances en el aumento de la adaptabilidad y la productividad de los bosques cultivados a través de la selección de los mejores genotipos. Los planes de mejora poseen objetivos múltiples, principalmente se busca mejorar la productividad, mejorar la forma de fustes, el aumento de resistencia a ciertas enfermedades y/o plagas, la resistencia a factores climáticos (sequías, heladas, inundaciones, etc.) entre otras.

En el presente trabajo se relevaron datos con el fin de estimar la generación de biomasa a futuro en los principales grupos de especies exóticas que se cultivan en Argentina. Los datos utilizados se refieren a los determinados en pruebas de campo, la variabilidad ambiental (suelo, clima, etc.) en general distorsionan los valores de ensayo para aumentar o disminuir, en función de la calidad de sitio, las tasas de crecimiento referidas de los ensayos.

Por otro lado, debe entenderse que, el aumento de las tasas de crecimiento, no conllevan a un aumento de volumen al finalizar el ciclo de cultivo, sino que el ciclo se hace más corto (turnos de corte de menos años). Es decir que se logra el mismo producto en menos tiempo y, por lo tanto, en el largo plazo se produce más, capturando más carbono. Esto significa que la incorporación de genética en especies forestales tendría un efecto significativo en la captura de carbono, siendo una efectiva medida de mitigación.

Debido a que el comportamiento de nuevos genotipos puede no ser uniforme en diferentes regiones forestales, su estimación es compleja. Asimismo, el grado de adopción puede ser más lento que en agricultura extensiva, donde la incorporación de genética puede ser anual. En especies forestales los tiempos se ajustan a los turnos de corte, que es cuando se incorporan nuevas variedades o nuevos clones. Esto dificulta incorporar esta acción de mitigación en proyecciones al año 2050.

En la actualidad se encuentran en estado de desarrollo y evaluación diferentes programas de mejora que utilizan diversos procedimientos, que permiten obtener mejoras en distintas características que apuntan a satisfacer las demandas del mercado.

Los productos de madera recolectada (PMR) es una categoría que no ha sido aún incorporada en los inventarios GEI. La misma constituye una fuente de captura de carbono en stocks de productos cuyos plazos de emisión exceden el año. En los inventarios GEI, la extracción de madera tiene dos destinos: combustible (leña o carbón) o madera propiamente dicha. La madera con destino a la industria del papel, mueblería y construcción es tratada como una emisión del año. Este procedimiento no es preciso ya que estos productos de madera permanecen en el tiempo, en plazos cortos para los productos de la industria del papel (5 años) y más extensos para mueblería, construcción y otros usos (desde 20 a 100 años) (IPCC, 2006).

El capítulo 12 del Volumen 4 de la directriz IPCC 2006 provee lineamientos para la estimación de los Productos de Madera Recolectada (PMR)²⁵. Las variables para tener en cuenta son los PMR contenidos en los "productos en uso" (o en servicio) y los PMR descartados (SEDS). A su vez debe

²⁵ Según explica la directriz IPCC 2006: "Las Directrices del IPCC de 1996 (Vol. III, p.5.17, Recuadro 5) no proporcionaron métodos para estimar el carbono retenido en los PMR y recomendaron, a los fines de efectuar cálculos básicos, una hipótesis por defecto expresada como «...toda la biomasa de carbono recolectada se oxida en el año de la extracción [cosecha]». Esto se basó en la percepción de que las existencias de PMR no cambian. Es decir, el flujo de entrada y de salida anual de carbono para el reservorio de PMR se suponía igual y se podría reemplazar la oxidación de las existencias de productos de madera preexistentes (y, por lo tanto, omitirse) mediante una oxidación implícita justo después de la cosecha. (...)»

Puesto que, en general, las entradas no equivalen a las salidas y que el carbono puede permanecer almacenado en los PMR por largos periodos, es necesario tomar en cuenta este tiempo de almacenamiento al proporcionar directrices para estimar el aporte de los PMR a las emisiones/absorciones de CO₂ del sector AFOLU.

Los PMR incluyen todo el material de madera (incluida la corteza) que abandona los sitios de recolección. La broza y otro material que queda en los sitios de recolección no se considera PMR y debe considerarse materia orgánica muerta en la categoría correspondiente de uso de la tierra de los Capítulos 4, 5, 6, 8 y 9 de las Directrices. Los PMR constituyen un reservorio de carbono. El tiempo durante el cual se conserva el carbono en los productos varía según el producto y sus usos. Por ejemplo, la madera combustible y los residuos de la planta pueden quemarse en el año de la cosecha; es probable que muchos tipos de papel tengan una vida útil en usos de menos de 5 años, lo cual puede incluir el reciclado del papel; y la madera aserrada o los paneles usados en edificios pueden conservarse durante décadas, hasta más de 100 años. Los PMR descartados pueden depositarse en sitios de eliminación de desechos sólidos (SEDS), donde pueden persistir por periodos prolongados. Debido a este almacenamiento en productos en uso y en los SEDS, la oxidación de los productos de madera recolectada en un año dado puede ser menos, o quizá más, que la cantidad total de madera recolectada en tal año. En todo el mundo –según un estudio realizado por Winjum et al. (1998) y un informe de la secretaria de la CMNUCC (2003)- la cantidad de carbono que se conserva en los productos de madera recolectada tiende a aumentar.

considerarse en la contabilización de PMR, las entradas al país provenientes de importaciones y las salidas por exportaciones.

Por lo tanto, las capturas de carbono por PMR correspondieron a una fracción de la "Producción forestal del año". La cantidad estimada como flujo de entrada anual, representa el 55% de productos de madera industrializables puestos en servicio, estimados por el MAYDS. Esto corresponde al valor de eficiencia promedio de conversión de materia prima de los sectores foresto industriales (aserrado, laminado, flaqueado). No se consideró el volumen destinado a celulosa en la industria del papel y la oxidación de los productos se estimó considerando el valor por defecto de una vida media de 30 años para madera sólida. Los detalles del cálculo se encuentran en el informe preliminar del BUR 2 para el sector AFOLU (SAyDS, 2017).

En la Tabla 11 se presentan los resultados de la captura de carbono para los escenarios alto y carbono neutral según las hipótesis de áreas forestadas a nivel nacional.

Tabla 11: Captura de carbono a partir de implementación de medidas de bosques cultivados

	Escenario alto		Escenario Carbono Neutral al 2050	
	Promedio MtCO ₂ e/año	Acumulado al 2050 MtCO ₂ e	Promedio MtCO ₂ e/año	Acumulado al 2050 MtCO ₂ e
Has forestadas	60 mil ha/año		270 mil ha/año	
Medidas	Promedio MtCO ₂ e/año	Acumulado al 2050 MtCO ₂ e	Promedio MtCO ₂ e/año	Acumulado al 2050 MtCO ₂ e
Bosques y PMR	19.20	576.0	127.59	4.338.0

Fuente: Elaboración propia

Consideraciones preliminares sobre requerimientos de inversión

A partir del análisis realizado en torno a las medidas de mitigación para los sectores cultivos agrícolas, sistemas ganaderos y bosques cultivados, en la Tabla 12 a continuación se resumen los potenciales de mitigación estimados para el sector AFOLU, como reducciones totales y por unidad de producto según las acciones propuestas.

Tabla 12: Potenciales de mitigación estimados para el sector AFOLU para el período 2020-2050

Escenarios	Promedio MtCO ₂ e/año		Acumulado al 2050 MtCO ₂ e	
	Alto	Carbono neutralidad	Alto	Carbono neutralidad
Bosques y PMR	19,2	127,6	576,0	4.338,0
Inhibidores Volatilización Urea	0,3	0,3	9,2	9,2
Carbono Suelos Agrícolas y ganaderos	16,7	16,7	501,0	501,0
C en Suelo- aplicación de Biochar	1,4	1,4	40,8	40,8

Totales	37,6	146,0	1.127,0	4.889,0
% de Mitigación Equivalente al total de emisiones de AFOLU al año 2050			23%	99%

Fuente: Elaboración propia

Las Medidas de Mitigación evaluadas son totalmente compatibles con los objetivos buscados por los actores del sector en relación a: i) aumentar la eficiencia de producción y del uso de los recursos; ii) aumentar la diversificación de cultivos; iii) aumentar el nivel de carbono en el suelo; iv) impulsar el desarrollo del sector forestal.

La captura neta de carbono mediante la expansión del sector forestal permitiría reducir muy significativamente las emisiones de un sector clave en la generación de divisas y de empleo en todo el territorio nacional, al mismo tiempo que impulsaría el crecimiento de una actividad que se encuentra ralentizada a nivel nacional.

La **expansión del área con Bosques Cultivados tiene un potencial claramente cuantificable y además de gran impacto** de secuestro de carbono con miras al 2050. Sin embargo, la dimensión del área necesaria para alcanzar la carbono neutralidad del sector, no parece fácilmente alcanzable en plazo tan cercano, considerando lo que ha surgido de las consultas y diálogos con expertos y las estadísticas oficiales que la dinámica del sector viene ralentizando el incremento del área forestada en las últimas décadas.

Si bien es factible expandir el sector forestal, la tasa de incremento anual promedio al 2050 supera significativamente los valores actuales, por lo que se requeriría una verdadera política de estado para generar un impulso consistente tanto para lograr la expansión del área forestada como la del consumo y demanda de madera.

Además, debe analizarse la disponibilidad de superficie con aptitud forestal a nivel nacional, como así también instrumentos e incentivos para la rápida instalación de industria que acompañe el crecimiento de la producción forestal.

En el caso de las **tecnologías de insumos** (PGPR, Inhibidores de volatilización y uso de Biochar) tienen un costo y un beneficio relativamente fácil de cuantificar, pero su impacto desde el punto de vista de la mitigación es relativamente bajo.

Las **tecnologías de procesos** referidas a prácticas de manejo para incrementar el carbono en el suelo (rotaciones adecuadas y cultivos de servicios) o mejorar la productividad en Ganadería, son de mayor impacto que la anteriores y tienen un "costo muy bajo" de implementación para el productor, pero serán incorporadas en la medida que sean rentables. No obstante, su adopción es de mayor complejidad por la cantidad de actores involucrados y la variabilidad regional, las

implicaciones que ello tiene desde el punto de vista de disseminación y capacitación para la introducción de un cambio cultural.

Paralelamente, es necesario incentivar la adopción de buenas prácticas y su difusión. Recientemente, la provincia de Córdoba ha implementado un programa de incentivos de Buenas Prácticas agrícolas.

El **secuestro en productos de madera recolectada puede incrementar la eficiencia de la actividad forestal** en un 20% o más. El **Sector Foresto-Industrial tiene un gran potencial de secuestro de carbono y una alta capacidad transformacional** para todas las regiones del país y un alto potencial de crecimiento en toda su cadena y generación de empleo.

Es posible alcanzar la descarbonización hacia 2050 con las tecnologías disponibles de mitigación y captura y la reasignación de una parte no menor de los flujos de inversión actuales. Las transformaciones identificadas se muestran **extremadamente desafiantes en términos de los requerimientos de capital invertido y desarrollo de instrumentos financieros y de política pública.**

En Bosques cultivados, el costo de implantación de una hectárea forestada es de aproximadamente 1.400 dólares. La implantación anual de 270.000 hectáreas implicaría una inversión total anual de alrededor de 380 millones de dólares, equivalente a 11 mil millones de dólares al cabo de 30 años (2050). Actualmente existe la ley de promoción forestal (25.080 y modificaciones posteriores) que subsidia el 80% de la inversión. Por lo tanto, se debe considerar este incremento como un mayor requerimiento en el presupuesto público nacional y sus implicaciones. Adicionalmente, es clave incentivar la demanda de productos forestales por parte de la industria, lo cual fue identificado como principal barrera para esa cadena de valor.

Con relación a los costos de implementación del resto de las medidas, algunas pueden ser estimadas de manera preliminar en términos económicos. En el caso de utilizar Urea NBPT, el costo "extra" para el productor sería alrededor de 50 USD/tn, por encima del precio de la urea común. De este modo, una forma lineal de estimar este costo sería multiplicar el consumo de urea por 50 USD/tn y afectarlo anualmente por su grado creciente de adopción. Estimando un consumo medio anual de 2.160.000 toneladas de urea para el período 2020-2050, el costo de la tecnología representaría, a valores actuales, 108 millones de dólares por año, considerando una adopción del 100% por parte de la producción agrícola.

En relación con tecnologías PGPR, hay varios productos y su costo oscila alrededor de los 5 USD/ha. El costo extra podría estimarse multiplicando la superficie cultivada con cereales y soja y su nivel de adopción anual. Considerando la proyección del incremento del área cultivada con cereales y soja, la superficie promedio para el período 2020-2050 sería de 42 millones de

hectáreas. Un escenario de adopción total de estas tecnologías representaría un valor máximo de inversión anual de 210 millones de dólares.

La adopción de Biochar en un 60% del área frutícola nacional a una dosis anual de 5 tn/ha, implicaría una producción de 1,68 millones de toneladas de Biochar por año. Con la tecnología actual se requiere una inversión aproximada de un millón de dólares para una planta de producción de 1.000 ton/año de Biochar. Esto implicaría una inversión máxima de 1.680 millones de dólares, que podría reducirse significativamente en plantas de mayor escala o con nuevas tecnologías de producción al 2050.

En ganadería se estimaron escenarios de mejora (alto, medio y bajo) que implican niveles crecientes de eficiencia de productividad del rodeo nacional. Este objetivo implica principalmente el impulso de programas de producción de carne que difundan e incentiven la adopción de tecnologías de manejo (procesos reproductivos, nutricionales y sanitarios). Esta suerte de conjunto de buenas prácticas ganaderas, implicaría en cierto modo un "costo cero" para el productor, pero no para el Estado que debe invertir en dichos programas a través de instituciones y organismos (INTA, SENASA etc.).

3. Conclusiones preliminares para la descarbonización del sector AFOLU y del sector Energía y Transporte

La adopción de una senda de descarbonización profunda en Argentina requiere intensificar los esfuerzos en sectores clave, poniendo en marcha transiciones principalmente, aunque no sólo, en los sectores de la energía, el transporte y la agricultura, la silvicultura y otros usos de la tierra (AFOLU).

Merecen destacarse algunos aspectos que permiten dimensionar, por un lado, la magnitud del esfuerzo requerido para lograr las transformaciones aquí descritas, y por el otro realizar un primer acercamiento a su factibilidad en términos de la experiencia histórica de Argentina.

En este contexto, la forestación y la reforestación constituyen una estrategia central de mitigación para reducir las emisiones netas y asegurar la remoción a gran escala. La consideración y aplicación de la opción de forestación y reforestación es coherente con las vías de descarbonización previstas por las políticas climáticas nacionales.

La forestación y la reforestación presentan un bajo costo interno por tonelada secuestrada (de alrededor de 3 USD por tonelada de CO₂e), por lo que deben ser priorizadas en el corto plazo. A pesar de su bajo costo por tonelada de CO₂e, los escenarios de forestación elaborados estiman inversiones que proporcionan una fuente importante de empleo primario directo. Es posible que

las inversiones y los efectos en el empleo y el PIB sean mayores que los estimados, si la cadena de valor industrial de la madera se desarrolla de forma significativa aguas abajo.

Los cambios en las prácticas de producción ganadera, en particular los relacionados con el aumento de las reservas de carbono del suelo, pueden proporcionar medios adicionales para aumentar la ambición de mitigación a corto y medio plazo.

Del mismo modo, los cambios en las prácticas agrícolas actuales si bien ya en evolución (y, por tanto, técnica y culturalmente viables) pueden contribuir a una reducción incremental de las emisiones. La aplicación de biocarbón en los suelos podría secuestrar hasta 2,5 megatoneladas de CO₂e al año en 2050, considerando únicamente los árboles frutales. La expansión a otros cultivos intensivos y, posteriormente, a los cultivos extensivos podría ser una ventaja a explorar dedicándole más esfuerzos de investigación e iniciando proyectos piloto. Por otra parte, los escenarios desarrollados sumarían aproximadamente hasta 900 millones de dólares de inversión para el periodo 2020-2050.

Por otra parte, el correlato de los requerimientos de la transformación del sector energético, a partir de la introducción de generación a gran escala de fuentes renovables, medidas de eficiencia energética y la electromovilidad, es un notable incremento en los montos de inversión en nueva capacidad instalada, que a los fines de esta primera aproximación excluyen las inversiones requeridas en expansiones del sistema de transmisión eléctrica, que serían muy significativas.

Según el escenario de máximo crecimiento, la instalación de nueva potencia requeriría hasta un promedio anual en la última década del período de estimación de 11,5 mil millones de USD, que contrastan con el promedio aproximado de 2 mil millones de USD invertidos anualmente durante los diez años previos al año base (período en que se incluye este último).

En el periodo 2012-2020 las inversiones en upstream de hidrocarburos alcanzaron los 7,1 mil millones de USD, que sumados a los 2,02 mil millones de USD de nueva potencia eléctrica totalizan 9,12 mil millones de USD anuales. Al contrastar este valor con los 11,5 mil millones de USD requeridos en promedio para la última década de estos escenarios, se observa que el orden de magnitud de las inversiones requeridas anualmente (en promedio) es aproximadamente del mismo orden, encontrándose 26% por encima de aquel, pero creciendo aceleradamente hacia los últimos años, en la medida en la que se electrifican más consumos.

A su vez, y estrictamente a los fines ilustrativos, cabe destacar que los subsidios (a los que aquí nos referimos como transferencias para gastos corrientes) se encuentran en promedio en la última década en el orden de los 9,87 mil millones de USD anuales, de los cuales aproximadamente el 35% corresponde a combustibles fósiles, de lo que se desprenden al menos dos cuestiones relevantes:

- en primer lugar, que las transferencias para gastos corrientes actualmente erogadas por el Estado Nacional para subsidiar la energía se encuentran en el orden de aproximación expeditiva de las inversiones en nueva generación en la década de 2041-2050 (y la exceden para las décadas previas);
- en segundo lugar, que resulta de alta relevancia conocer el impacto de estas nuevas políticas en el costo medio del sistema, pues de ello dependerá también la capacidad de la demanda de pagar por el costo económico de la provisión de la energía, como también de su asequibilidad y eventuales costos fiscales.

Argentina podría enfrentar restricciones duraderas de financiamiento climático y sostenible, que hoy se ven acentuadas además por la pandemia. La decisión sobre el potencial desarrollo de los conjuntos de opciones de mitigación requiere información precisa sobre los costos de la mitigación/captura y una evaluación detallada de los riesgos de implementación. También explorar nuevas fuentes de financiación adecuadas a las necesidades y en línea con lo que se plantea en el Acuerdo de París.

La evaluación general de la viabilidad técnica y económica de los abordajes debe integrarse en el marco que proporcionan la estrategia a largo plazo elaborada por el país, y, asimismo, en la próxima generación de NDC.

El potencial para consolidar flujos de financiamiento complementarios en el contexto del Artículo 6 podría contribuir a financiar las transiciones de largo plazo necesarias, aunque esta opción depende de la posición que adopte el país en esa materia.

Finalmente, se recomiendan evaluaciones integrales del impacto de las políticas para elucidar los posibles diseños de políticas para movilizar los conjuntos de opciones de mitigación y las implicaciones que tendrían también en el logro de los ODS.

4. Próximos pasos

A partir de los resultados de la evaluación de las oportunidades de opciones de mitigación existentes y nuevas se procederá a realizar el análisis de factibilidad económico-financiero de las medidas priorizadas, que se volcarán en las notas conceptuales de proyectos de mitigación.

Como parte de la identificación de las condiciones habilitantes para la descarbonización de la economía del país y, específicamente, de las oportunidades priorizadas se desarrollarán propuestas de política e instrumentos financieros en base a los resultados del análisis de factibilidad de manera de generar insumos que permitan viabilizar las mismas.

Por último, las notas de concepto de los proyectos de mitigación compondrán el plan de inversión sectorial que consolida las medidas priorizadas, que en el caso de Argentina, se enfocarán en el sector de energía y transporte.

VII. Anexos

1. Matriz multicriterio de priorización

Se incluye archivo con la matriz multicriterio de priorización de las medidas de mitigación.

2. Metodología y desarrollo de escenarios – Energía y Transporte

Síntesis metodológica

El abordaje metodológico utilizado para el presente trabajo consiste en la construcción de escenarios de estado final del sistema deseables (E_f) y de la descripción de diversas trayectorias posibles determinadas mediante la técnica de *backcasting*, determinadas por el Estado Inicial del Sistema (E_o), tres conjuntos de supuestos asociados con escenarios de evolución del PIB sujetos a restricciones del sistema y objetivos de penetración de tecnologías y de descarbonización, para una evolución única estimada del crecimiento de la población. Los estados inicial y final del sistema, E_o y E_f se describen en la sección siguiente.

A los fines de la evaluación de los modelos econométricos a utilizarse para este trabajo se testearon como variables independientes la evolución de la población, del PIB, del PIB per cápita, del Valor Agregado de la Producción y del Ingreso Medio per cápita, así como sus respectivas transformaciones logarítmicas, en caso de corresponder.

Respecto de la evolución del PIB, se asumieron tasas de crecimiento que tienden a la tasa de crecimiento de largo plazo, supuestos que se encuentran acordes con las tasas estimadas por la OECD para los escenarios medio y alto²⁶.

Respecto de los supuestos de población, hasta el año 2040 se utilizaron las proyecciones realizadas por el INDEC sobre la base del Censo Nacional de Población Hogares y Viviendas de 2010²⁷, extrapolándose los resultados hasta el año 2050.

Los principales supuestos clave seleccionados se presentan en la Tabla 13 a continuación.

Tabla 13: Síntesis de supuestos de población y evolución del PIB

	Escenario	2021-2030	2031-2040	2041-2050	2021-2050
Evolución del PIB (var% i.a.)	Bajo	2.2%	1.8%	1.8%	1.9%
	Medio	2.5%	2.2%	2.2%	2.3%
	Alto	3.1%	3.0%	3.0%	3.0%
Población (Miles habitantes final) (var% i.a.)	Todos	49.034	52.472	55.618	55.618
		0.9%	0.7%	0.6%	0.7%
Evolución del PIB per cápita (var% i.a.)	Bajo	1.4%	1.1%	1.2%	1.2%
	Medio	1.6%	1.5%	1.6%	1.6%
	Alto	2.2%	2.3%	2.4%	2.3%

Fuente: Elaboración propia.

²⁶ OECD (2021), Real GDP long-term forecast (indicator). doi: 10.1787/d927bc18-en (Accessed on 03 July 2021)

²⁷ Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. Población estimada al 1 de julio de cada año calendario por sexo. Años 2010-2040. <https://www.indec.gov.ar/indec/web/Nivel4-Tema-2-24-84>

Etapla 0. La etapa inicial del proceso consistió en definir las condiciones determinadas de manera exógena al modelo, tales como el orden de magnitud de la penetración de la energía eléctrica sobre los distintos sectores de consumo final, las ganancias de eficiencia y el grado de penetración de las fuentes renovables en la generación eléctrica, así como en la identificación de variables independientes clave de entrada para las diferentes etapas, tanto para el subsector de transporte liviano como el de la generación de energía eléctrica.

Etapla 1. Definidos los lineamientos que serán descriptos en la sección de estado final del sistema, la primera etapa del proceso de construcción de los escenarios consistió en la confección de modelos simplificados de consumo final total de energía que fueron construidos en todos los sectores, excepto en transporte liviano (caso en el que se utilizó una técnica híbrida basada en análisis de uso final mediante módulos homogéneos y análisis econométrico), mediante técnicas econométricas de regresión lineal múltiple basadas en Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO) para el escenario de línea de base. Respecto de la composición de las fuentes que abastecen dicho uso se computaron los datos históricos como punto de partida.

La base de datos utilizada se construyó a partir de los datos de los Balances Energéticos Nacionales de la Secretaría de Energía entre los años 1960 y 2019, los Censos Nacionales de Población, Hogares y Viviendas de INDEC, interpolados linealmente para los años intercensales, y las proyecciones de población realizadas por el INDEC para la variable de población de 2010 hasta 2019. Respecto del PIB, se utilizó desde 2004 el PIB anual publicado por INDEC²⁸, empalmado para el período 1960—2004 con la serie resultante de las tasas de variaciones interanuales que surgen de la serie de PBI ARKLEMS Encadenado Tornquist²⁹ del proyecto ARKLEMS-LAND. Por su parte, las variables independientes de ingreso medio fueron descartadas aplicando el principio de parsimonia teniendo en cuenta que las variables remanentes brindaban información suficientemente significativa para la precisión requerida en el marco de este proyecto.

Las variables explicativas para los modelos de regresión lineal múltiple para el consumo final energético de cada subsector fueron testeadas mediante la librería *regsubsets*³⁰ del software estadístico R³¹, que brinda herramientas para seleccionar el mejor conjunto de variables independientes posible para diferentes cantidades de aquellas.

²⁸ INDEC. Series trimestrales de oferta y demanda globales. Años 2004-2021. <https://www.indec.gov.ar/indec/web/Nivel4-Tema-3-9-47>

²⁹ Coremberg, A, Ramos, A, Gerchunoff, P., Heymann, D. *PIB Argentina 1900-2012: En búsqueda de una tendencia de crecimiento sostenible*, VII Congreso Internacional de Economía y Gestión ECON 2013, Facultad de Ciencias Económicas UBA. <https://arklems.org/pbi/>

³⁰ Thomas Lumley based on Fortran code by Alan Miller (2020). leaps: Regression Subset Selection. R package version 3.1. <https://CRAN.R-project.org/package=leaps>.

³¹ R Core Team (2019). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.

La Tabla 14 siguiente sintetiza los resultados y los principales datos estadísticos resultantes de los modelos de regresión utilizados.

Tabla 14: Coeficientes estimados para los modelos econométricos de consumos energéticos sectoriales

	RESCOM	TRANSP	AGROP	IND	NOENE
Constante	-9257***	-1582**	-3091***	-852.3'	-1087**
PIB	0.01495***	0.0192***	2.249e-03**	4.761e-03**	1.81E-03
Población	3.998e-04***	1.068e-04**	1.321e-04***	2.539e-04***	7.201e-05**
R	0.992	0.989	0.977	0.977	0.900
R²	0.984	0.978	0.954	0.955	0.810
R² ajustado	0.984	0.977	0.952	0.954	0.803
Observaciones	60	60	60	60	60
p-value F	< 2.2e-16	< 2.2e-16	< 2.2e-16	< 2.2e-16	< 2.2e-16

Fuente: Elaboración propia sobre la base de datos de Balances Energéticos Nacionales, INDEC (Población y PIB posterior a 2004) y PBI ARKLEMS Encadenado Tornquist (empalme anterior a 2004).

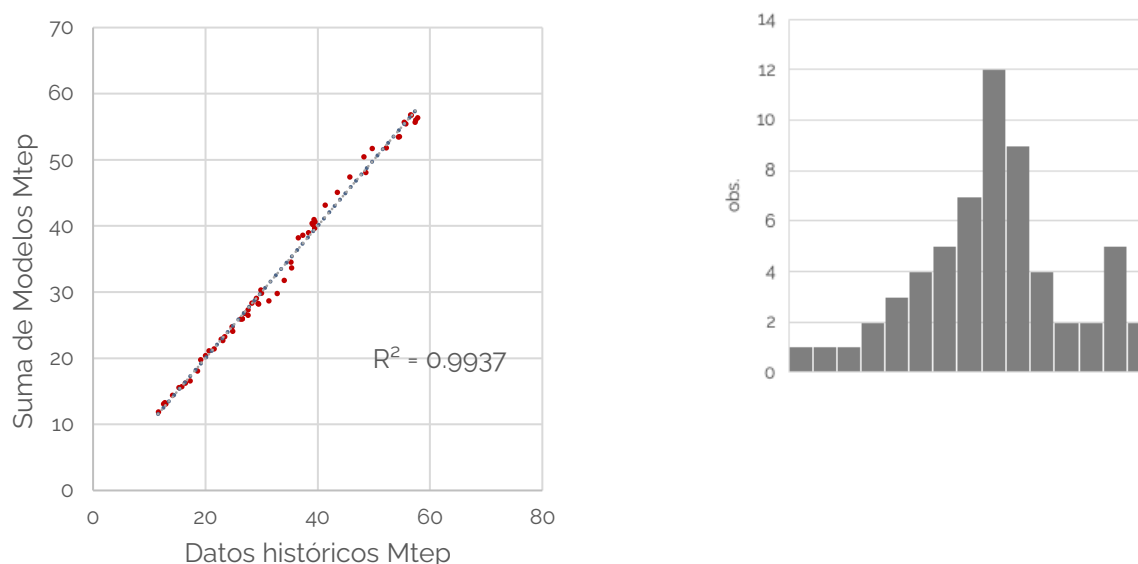
Nota: (***) coeficiente significativo al 0.1%; (**) coeficiente significativo al 1% (*) coeficiente significativo al 5%; (') coeficiente significativo al 10%

En todos los casos se descartó heterocedasticidad mediante la prueba de Breusch-Pagan utilizando la librería `lmtest`³², excepto en el caso del transporte, que se presenta con fines ilustrativos dado que fue sustituido por un modelo de uso final con módulos homogéneos, y en el caso de consumos no energéticos, que no es utilizado a los fines de las proyecciones, sino que se usa para verificar el modelo en su conjunto.

Posteriormente, a los fines de evaluar el ajuste del modelo agregado de consumo final de energía como la suma de los modelos sectoriales, se contrastaron los resultados de las sumas obtenidas para cada año con los datos históricos, cuyos resultados se sintetizan en la siguiente Figura 5, arrojando un R² de 0.99%.

³² Achim Zeileis, Torsten Hothorn (2002). Diagnostic Checking in Regression Relationships. R News 2(3), 7-10. URL <https://CRAN.R-project.org/doc/Rnews/>

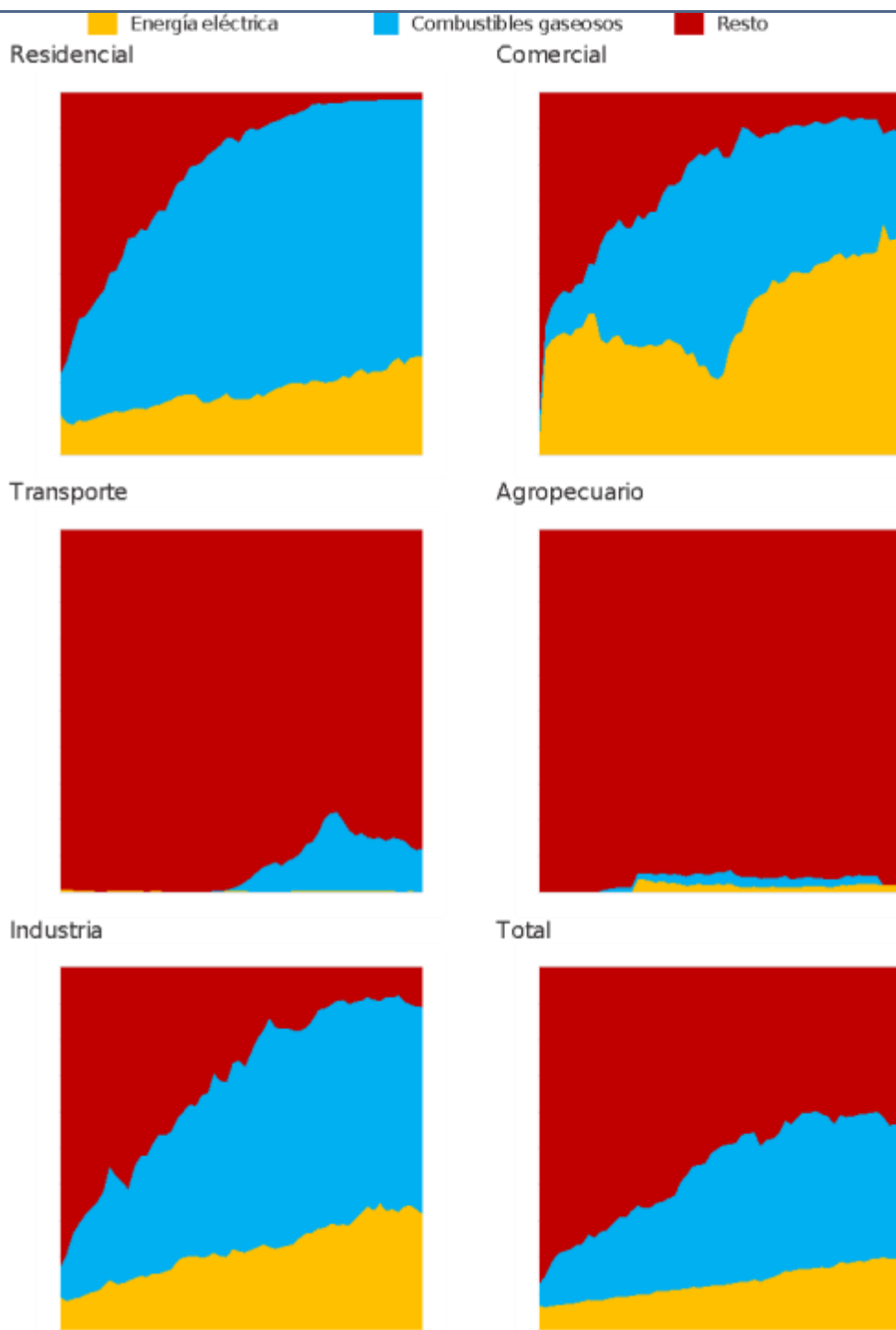
Figura 5: Contraste entre la suma de los resultados de los modelos individuales y los datos históricos de consumo final de energía y la distribución de los errores



Fuente: Elaboración propia sobre la base de datos de Balances Energéticos Nacionales y resultados de la suma de los modelos individuales.

Etapas 2. Posteriormente, sobre la base del punto de partida histórico y de las definiciones de orden de magnitud deseado para el Estado Final E_r , se establecieron objetivos de electrificación de consumos finales teniendo en cuenta —sobre la base de la escasa información disponible al momento— la distribución de los usos finales energéticos por cada sector. La Figura 6 muestra la evolución reciente de la penetración de la energía eléctrica, los combustibles gaseosos y el resto de las fuentes de energía en el uso final por cada sector.

Figura 6: Energía eléctrica, combustibles gaseosos y resto de fuentes en el consumo final por subsector, 1960-2019



Fuente: Elaboración propia sobre la base de datos de Balances Energéticos Nacionales.

Sobre la base de esta información de partida se determinaron los estados inicial, final y de transición de electrificación por subsector (Tabla 15).

Tabla 15: Estados inicial, de transición y final para la penetración de la energía eléctrica

Sector	Estado inicial	Transición		Estado final
	2018	2030	2040	2050
Residencial	27%	42%	63%	95%
Comercial	59%	71%	82%	95%
Transporte liviano	0%	1%	18%	66%
Transporte mediano y pesado	0%	1%	4%	25%
Agropecuario	2%	5%	13%	30%
Industria	33%	44%	59%	80%

Fuente: Elaboración propia.

Cabe destacar que en todos los casos los objetivos de penetración se muestran en términos de consumo final sectorial y que, debido a las diferencias de eficiencia entre los equipos eléctricos en comparación con los motores de combustión interna, las proporciones sobre el uso final (es decir, ajustado por eficiencia) resultan mayores.

En el caso del transporte liviano, cuya metodología se presenta por separado, los objetivos fueron impuestos indirectamente a partir de objetivos de penetración del parque eléctrico sobre el total, mientras que en el caso del transporte mediano y pesado fue impuesto directamente. Respecto de este punto, el supuesto del modelo agregado es que los consumos finales en transporte no sustituidos con energía eléctrica son sustituidos con biocombustibles³³ y en menor medida con hidrógeno (este último en particular, en el caso del transporte pesado).

Etapas 3. Seguidamente se establecieron vectores de eficiencia para cada uno de los sectores analizados sobre la base de las medidas identificadas en el documento Escenarios Energéticos 2030, edición 2019, de la Subsecretaría de Planeamiento Energético³⁴. Se adicionaron las ganancias de eficiencia vinculadas con el transporte liviano impulsado por energía eléctrica, obteniéndose así el consumo final por sector de consumo (**Etapas 4**). El consumo final fue dividido en el abastecido mediante energía eléctrica y el resto de las fuentes, con las consideraciones expresadas anteriormente, y estableciéndose de manera simplificada —a los fines de la

³³ Al respecto, ver Hilbert, J. y Caratori, L. *El potencial de los biocombustibles argentinos para contribuir al cumplimiento de las contribuciones de Argentina en el marco del Acuerdo de París*. INTA-FTDT, 2021 (in press).

³⁴ Mastronardi, L y Caratori, L (eds.). *Escenarios Energéticos de Argentina al 2030 – Edición 2019*. Subsecretaría de Planeamiento Energético, 2019.

estimación de los requerimientos de potencia— regímenes de consumo de energía eléctrica en los horarios “pico” de demanda y en los horarios de valle y resto entre 2018 y 2050, atendiendo la penetración en el parque, regímenes de uso y luego de 2035, medidas de manejo de la demanda. En la Tabla 16 siguiente se sintetiza la distribución utilizada para el año 2050.

Tabla 16: Distribución horaria de la demanda de energía eléctrica por sector para el año 2050

	Pico	Resto y valle
Residencial y comercial	90%	10%
Transporte (carga)	50%	50%
Agropecuario	50%	50%
Industrial	75%	25%

Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, se establecieron objetivos de descentralización (**Etapa 5**), considerando para el año 2050 una penetración de la energía eléctrica distribuida a partir de fuentes renovables (principalmente solar fotovoltaica) del 14% sobre el consumo final de energía eléctrica, con valores intermedios para 2030 (4%) y 2040 (7%).

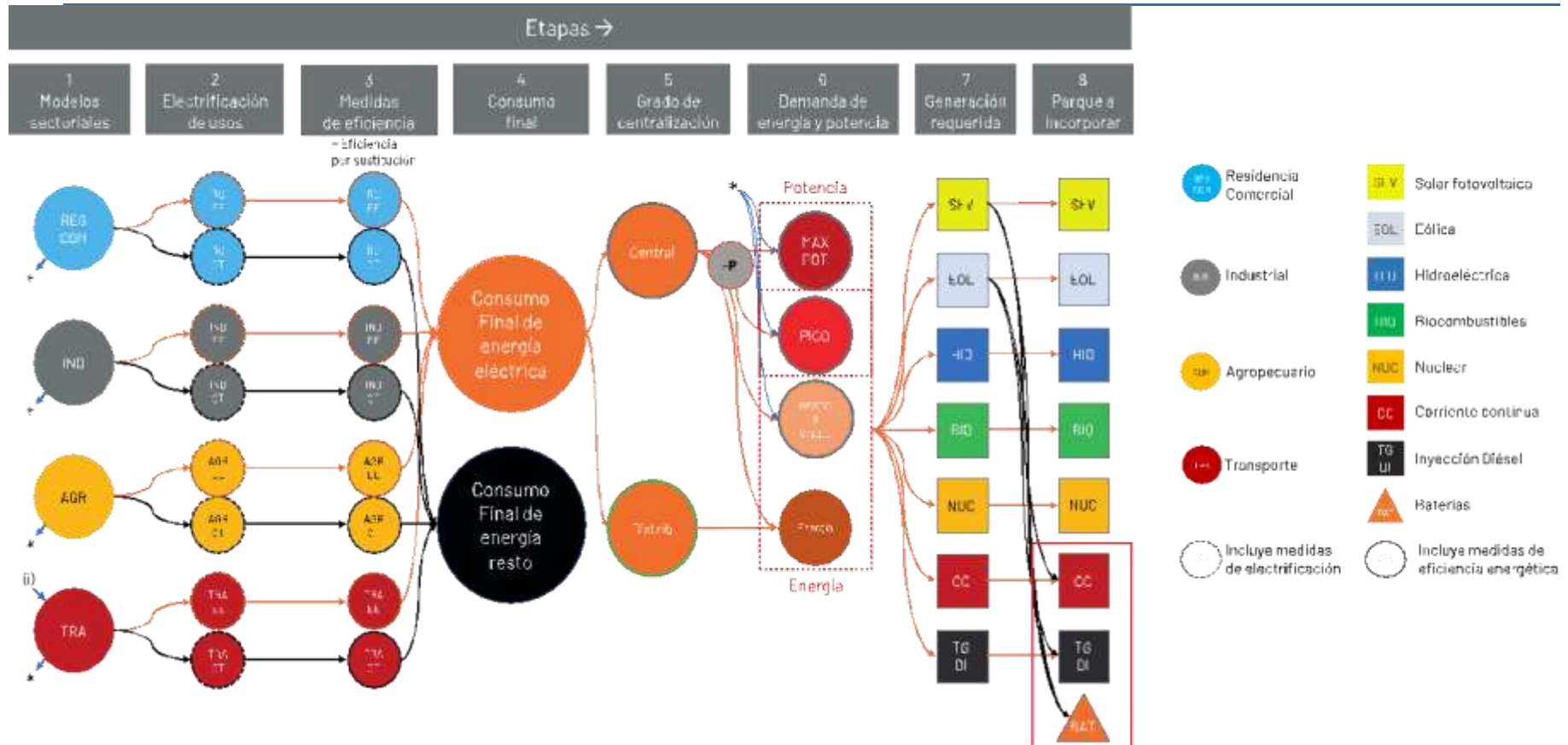
De la aplicación de las distribuciones obtenidas en las etapas 4 y 5, en la **Etapa 6** se determinaron las demandas de energía y potencia eléctrica para el horizonte de los escenarios, tanto de energía descentralizada como de energía proveniente del sistema interconectado nacional (SIN). Para el SIN se aplicó el promedio histórico de pérdidas de transporte y distribución, valor que ronda el 23% en el último quinquenio, mientras que en el caso de la energía distribuida las mismas se consideraron nulas. Así se determinaron escenarios de generación de energía (**Etapa 7**), requerimientos de incorporación de potencia por fuente, ajustada por retiros de centrales térmicas de respaldo (**Etapa 8**) para las fuentes intermitentes (centrales térmicas, baterías pilas de H₂ y bombeo) y de inversión para satisfacer dichas necesidades sujetas a requerimientos esbozados en el diseño del “Estado Final” (ver sección correspondiente), minimizando la participación de las tecnologías de generación termoeléctrica sujetas a restricciones de margen de reserva y de menores requerimientos de inversión en el largo plazo.

Respecto de este último punto, cabe destacar que, naturalmente, existen infinitas combinaciones de Estados Finales y de trayectorias posibles que cumplen a grandes rasgos con los criterios de reducir bajo restricciones físicas, económicas y comerciales la participación de las fuentes fósiles en el consumo final energético y en la generación eléctrica, y que, por lo tanto, los escenarios aquí presentados se exponen a los fines de brindar órdenes de magnitud que permitan evaluar a priori la razonabilidad de los objetivos propuestos y el esfuerzo requerido para alcanzarlos. En ese sentido, se resalta que estos escenarios no pretenden *predecir* el futuro, sino orientar la acción hacia ese futuro posible y deseado.

En tal sentido, esta evaluación preliminar de factibilidad arroja resultados que deberán ser evaluados en mayor profundidad en instancias posteriores, requiriéndose cuantificar las inversiones adicionales no contempladas aquí (por ejemplo, transporte y distribución eléctrica, infraestructura de carga de vehículos eléctricos), el impacto en el costo del sistema y su competitividad respecto de los parques y regímenes de despacho alternativos (en particular bajo distintos escenarios de instrumentos de fijación de precios al carbono), así como las medidas e instrumentos requeridos para viabilizar dicha transformación.

El esquema presentado en la Figura 7 a continuación, sintetiza las etapas de la metodología utilizada para la estimación de los requerimientos de incorporación de potencia eléctrica y de inversión en nueva capacidad de generación bajo los escenarios modelados, previamente descrita.

Figura 7: Esquema descriptivo de la metodología utilizada para la construcción de escenarios



Fuente: Elaboración propia.

Respecto de la metodología específica para **modelizar la demanda y sustitución de combustibles por energía eléctrica para vehículos livianos**, se procedió a estimar el uso final de energía sobre la base del parque estimado existente, y una estimación del parque futuro realizada mediante un modelo econométrico (**Etapa 1**) de MCO hasta 2050 a partir de la correlación entre las ventas de vehículos livianos y el PIB.

La base de datos se basa en la recopilación de estadísticas de ventas de automotores livianos en el mercado doméstico entre 1958 y 2019, obtenidos de los boletines anuales de la Asociación de fábricas de automotores (ADEFA), troncada al año 2000 debido a la disponibilidad de datos de ingreso medio per cápita, así como las estadísticas de registros y transferencias de la Dirección Nacional de Registro de la Propiedad Automotor (DRNPA), cotejados con las estadísticas de parque automotor de la Dirección General de Estadísticas y Censos de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Por su parte, se incluyeron los valores de ingreso medio per cápita publicados por el Ministerio de Economía,³⁵ de PIB empalmados según la metodología descrita en la sección anterior y de PIB per cápita, evaluándose también la alternativa de diferencias en diferencias³⁶.

De los modelos evaluados, el resultado superior de las alternativas correspondió a la regresión lineal simple entre ventas totales de vehículos livianos y PIB. A continuación, se presenta en la Tabla 17 la síntesis de los resultados y los principales datos estadísticos resultantes del modelo de regresión seleccionado.

Tabla 17: Coeficientes estimados para el modelo econométrico del parque vehicular

	Ventas_totales
Constante	-8.011e+05***
PIB	2.209***
R	0.992
R²	0.8316
R² ajustado	0.8196
Observaciones	16
p-value F	8.719e-07

*Nota: (***) coeficiente significativo al 0,1%; (**) coeficiente significativo al 1% (*) coeficiente significativo al 5%; (') coeficiente significativo al 10%*

³⁵ MTEySS – SSPEyE - Dirección General de Estudios y Estadísticas Laborales, en base a EPH (INDEC).

³⁶ Metodología que consiste en aplicar una doble diferencia, es decir busca comparar los cambios en el tiempo en la variable de interés entre el grupo de tratamiento (aquellos afectados por una intervención) y el grupo de control (aquellos que no se ven afectados por la intervención). Con datos de las variables de interés para varios puntos en el tiempo, especialmente datos de antes y de después de la intervención, se busca medir el impacto de la intervención.

El modelo resultante fue evaluado mediante el paquete de R `gvlma`³⁷ que permite evaluar de manera expeditiva el cumplimiento de las condiciones necesarias para la aplicación de un modelo de regresión lineal, incluyendo evaluación de heterocedasticidad.

Debido a las dificultades vinculadas con el acceso a estadísticas de calidad sobre el parque efectivamente activo —las altas son registradas, mientras que existe poca información que formalice las bajas de automotores del parque—, se realizó un ajuste simplificado de bajas (**Etapa 2**) sobre la base del supuesto de que la antigüedad promedio del parque automotor liviano es de 13 años, valor estimado a partir de consultas a expertos y estudios previos. Como valor de partida para el año 2018 se utilizó el parque definido para dicho año base en el documento Escenarios energéticos 2030 de la Secretaría de Energía, publicado en 2019³⁸, de 13 millones de automóviles.

Posteriormente se procedió, sobre la base de estadísticas de ventas mayoristas de la Secretaría de Energía³⁹ y de datos operativos del Ente Nacional Regulador del Gas (ENARGAS)⁴⁰, a estimar el consumo final total de transporte liviano (**Etapa 3**), para determinar un régimen de consumo en un escenario de línea de base.

Sobre la base de los rendimientos de los motores utilizados en el documento citado de Escenarios Energéticos 2030, edición 2019, realizado originalmente a partir de un estudio de mercado, (GNC 25%, Diésel 35%, Nafta 25%, eléctrico 67%), se aproximó la energía útil obtenida por los vehículos (**Etapa 4**), que fueron luego afectados por un vector de ganancias de eficiencia para cada tipo de vehículo en el período de análisis (**Etapa 5**).

Por su parte, mediante la aplicación de los mencionados supuestos de ventas y de retiros (**Etapa 6**), conjugados con los objetivos de penetración de vehículos eléctricos sobre las ventas anuales definidos en la etapa 0, presentada en la sección anterior, se realizó una estimación del parque futuro de vehículos automotores livianos en función de los tres escenarios de crecimiento del PIB descriptos con anterioridad (**Etapa 7**).

Finalmente, mediante la aplicación de los rendimientos de los motores presentados en la etapa 4 a los nuevos parques obtenidos en la etapa 6, se procedió a obtener los consumos finales estimados para el parque de vehículos eléctricos y de motores a combustión interna (**Etapa 8**). El

³⁷ Edsel A. Pena and Elizabeth H. Slate (2019). `gvlma`: Global Validation of Linear Models Assumptions. R package version 1.0.0.3. <https://CRAN.R-project.org/package=gvlma>

³⁸ Mastronardi, L. op. cit.

³⁹ Secretaría de Energía. Refinación y Comercialización de petróleo, gas y derivados (Tablas Dinámicas). SESCO Upstream. <http://datos.minem.gob.ar/dataset/refinacion-y-comercializacion-de-petroleo-gas-y-derivados-tablas-dinamicas> Consultado en junio de 2021.

⁴⁰ ENARGAS. Datos operativos de Transporte y Distribución de Gas, Sección 3. Numeral 3.1, Gas entregado por tipo de usuario. <https://www.enargas.gob.ar/secciones/transporte-y-distribucion/datos-operativos-sec.php?sec=3>

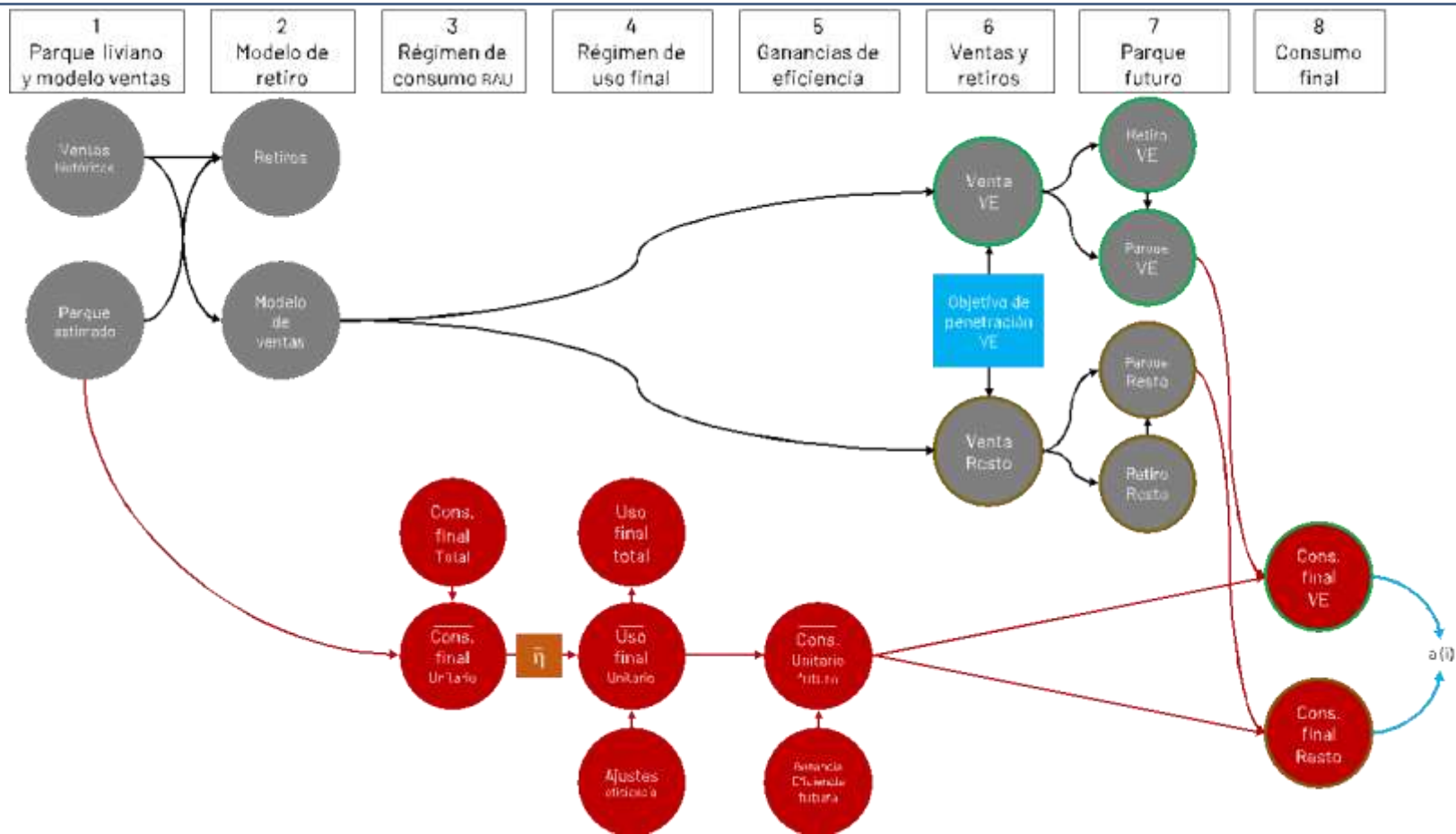
esquema presentado en la Figura 8 a continuación, sintetiza las etapas de la metodología utilizada para la para la construcción de escenarios de transporte liviano, previamente descripta.

Un importante supuesto implícito en este procedimiento es que no se modifican los comportamientos de los usuarios, una debilidad del modelo, conscientemente aceptada a la hora de la definición de los tres escenarios, que deberá ser mejorada en etapas futuras de este proceso, al incorporarse cambio modal y cambio de comportamiento. Una consecuencia de esta simplificación es que se ignoran cambios en la cantidad de pasajeros por automotor, la sustitución de vehículos automotores de pasajeros livianos por transporte público, *car-sharing* o transporte como servicio ("TaaS"), cambios en los regímenes de presencialidad laboral (teletrabajo o *home office*), desconcentración de la población mediante regímenes de migración de áreas urbanas a suburbanas o rurales, o bien potenciales efectos de sobreconsumo asociado a las mejoras de eficiencia, que pueden resultar en un consumo absoluto mayor que el previo a dichas mejoras debido, entre otros aspectos, a la reducción del costo variable de utilización (en este caso, por kilómetro recorrido), como fue descripto independientemente por Daniel Khazzoom⁴¹, al que suele referirse como el postulado de Khazzoom-Brookes, perteneciente al conjunto de los habitualmente llamados "efectos rebote", al nivel de una paradoja de Jevons⁴².

⁴¹ Khazzoom, J.D. Economic Implications of Mandated Efficiency in Standards for Household Appliances. The Energy Journal, 1980.

⁴² Alcott, B. Historical Overview of the Jevons paradox in the Literature. 2008.

Figura 8: Esquema descriptivo de la metodología utilizada para la construcción de escenarios de transporte liviano



Fuente: Elaboración propia.

Estados del sistema y cuantificación de principales resultados

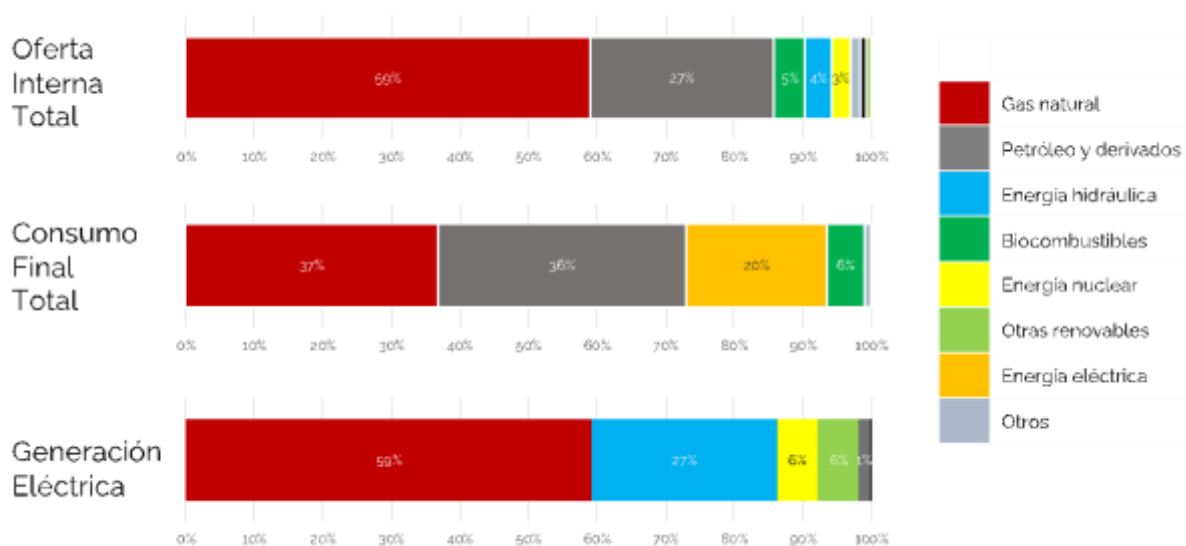
1.1. Estado Inicial del Sistema (E_0)

En esta subsección se sintetiza el estado inicial del sistema a los fines de esbozar el punto de partida de la modelación de escenarios.

Según el Balance Energético Nacional, en 2019 la oferta interna total de energía⁴³ (OIT) de Argentina, que representa la energía disponible para ser transformada y consumida domésticamente, alcanzaba 80,7 millones de toneladas equivalentes de petróleo (millones tep), y el consumo final de energía se ubicaba en 55,7 millones tep.

Como se esbozó en secciones anteriores, y se presenta en la Figura 9, Argentina es altamente intensiva en el consumo de combustibles fósiles para abastecer su demanda de energía doméstica, tanto en términos de consumo final (76%) como de oferta interna total (más del 86%), y en generación eléctrica (60%). Se registra la predominancia del gas natural (59% de la OIT), 37% del consumo final de energía y 59% de la generación eléctrica (más del 98%), pero en deterioro debido a la caída de la producción, compensada con combustibles líquidos y carbón.

Figura 9: Síntesis de la oferta y demanda agregadas de energía en Argentina



Fuente: Elaboración propia sobre la base de datos del Balance Energético Nacional de Argentina 2019 y de CAMMESA.

La siguiente Tabla 18 sintetiza, para el año 2019, la participación de cada sector de consumo final de energía sobre el total del país, así como su participación sobre el total del consumo final

doméstico de las principales fuentes de energía, agrupadas en renovables (utilizadas en consumo final), energía eléctrica y combustibles fósiles.

Tabla 18: Participación por sector de consumo en el uso final total por fuente de energía, 2019

	Residencial	Comercial y público	Transporte	Agropecuario	Industrial	Total
Consumo final total	26%	8%	33%	7%	26%	100%
Renovables	3%	2%	55%	5%	36%	100%
Electricidad	34%	25%	0%	1%	40%	100%
Combustibles fósiles	25%	4%	40%	9%	21%	100%
Por tipo de combustible fósil:						
Gas natural y GLP	46%	7%	10%	0%	37%	100%
Combustibles líquidos y sólidos	1%	2%	77%	19%	2%	100%

Fuente: Elaboración propia sobre la base de datos del Balance Energético Nacional de Argentina 2019. Subsecretaría de Planeamiento Energético, 2020.

Como puede observarse, el sector transporte constituía en 2019 el principal sector de consumo final energético (33%), seguido por los sectores residencial (26%) e industrial (26%), comercial y público (8%) y agropecuario (7%). A su vez, el sector de transporte lidera el consumo de combustibles fósiles, representando el 40% de su consumo en la totalidad del país, seguido en importancia por el sector residencial (25%) y el industrial (21%). El elevado peso del transporte sobre el consumo total de combustibles fósiles se ve agravado al considerar que dicho sector representa el 77% del consumo final de combustibles fósiles líquidos y sólidos —principalmente motonaftas y gasoil—, seguido por el sector agropecuario, que explica el 19% del consumo final de líquidos —principalmente gasoil. No obstante, cabe destacar que el sector transporte explica también el 55% del consumo final de fuentes renovables de energía —bioetanol y biodiésel—, seguido por la industria, que consume el 36% sobre el total doméstico —principalmente bagazo y leña.

La transposición de la matriz anterior brinda también información útil a los efectos de caracterizar el estado inicial del sistema.

Como puede observarse en la Tabla 19, los combustibles fósiles explican el 74% del consumo final de energía de Argentina, a los cuales el gas natural aporta 40 puntos porcentuales y los combustibles fósiles líquidos y sólidos 34 puntos porcentuales.

Los sectores más intensivos en términos de consumo final de combustibles fósiles líquidos y sólidos son el sector agropecuario (92%), seguido del sector de transporte (79%), con escasa

participación de los mismos en el resto de los sectores, mientras que en el caso del gas natural y el gas licuado de petróleo explican el 75% del consumo final de energía en el sector residencial, el 59% del consumo final de energía del sector industrial, el 32% del sector comercial y público, y el 12% en el caso del transporte.

La energía eléctrica, por su parte, abastece el 21% del consumo final total, con mayor penetración en el sector comercial y público (61%), seguido por el sector industrial (32%) y el sector residencial (27%); sectores en los que compite principalmente con el gas natural para usos de calefacción (residencial y público), de calor de procesos (industrial) y de cocción y calentamiento de agua (residencial).

Sin embargo, respecto de esta penetración de la energía eléctrica, si consideramos que el 60% de la electricidad se genera quemando combustibles fósiles (predominando el gas natural), podemos concluir que el papel de los fósiles en los sectores residencial y comercial resulta indirectamente cercano a los dos tercios del consumo final.

Cabe destacar que Argentina, con 9% de participación de combustibles renovables —bioetanol y biodiésel— en el consumo final del sector transporte se encuentra entre los cinco países del mundo con mayor penetración de esta fuente en el uso final, sentando una base relevante para la sustitución futura de usos "residuales" no electrificados en este sector, principalmente para el subsector de transporte de cargas y colectivo de pasajeros.

Tabla 19: Participación por fuente de energía en los consumos finales sectoriales, 2019

	Residencial	Comercial y público	Transporte	Agropecuario	Industrial	Total
Renovables	1%	1%	9%	4%	7%	5%
Electricidad	27%	61%	0%	2%	32%	21%
Combustibles fósiles	72%	38%	91%	94%	61%	74%
Total	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Por tipo de combustible fósil:						
Gas natural y GLP	71%	32%	12%	2%	59%	40%
Combustibles líquidos y sólidos	1%	6%	79%	92%	2%	34%

Fuente: Elaboración propia sobre la base de datos del Balance Energético Nacional de Argentina 2019. Subsecretaría de Planeamiento Energético, 2020.

Se detalla a continuación la participación de los distintos combustibles líquidos en el sector transporte, que resulta de especial interés.

Tabla 20: Principales combustibles utilizados en transporte y participación sobre consumo final

Combustible	Participación	Principal subsector
Motonaftas	36%	Vehículos livianos
Gasoil	39%	Transporte de carga, de pasajeros y en menor medida vehículos livianos
Gas natural	12%	Vehículos livianos
Biodiésel	6%	Ídem gasoil
Combustible para aviación	4%	Aviación
Bioetanol	3%	Ídem motonaftas

Fuente: Elaboración propia sobre la base de datos del Balance Energético Nacional de Argentina 2019. Subsecretaría de Planeamiento Energético, 2020.

Como se mencionó, los combustibles fósiles representan el 94% de la energía final consumida en el sector de transporte, el resto se distribuye entre la electricidad, con un aporte marginal. (algunos ferrocarriles urbanos y suburbanos y el subterráneo en la ciudad de Buenos Aires), y biocombustibles cuyo corte no alcanza lo establecido en la ley 26.093 que tiene como objetivo el 10% y el 12% para el biodiesel y el bioetanol respectivamente y ha presentado un deterioro progresivo durante los últimos años.

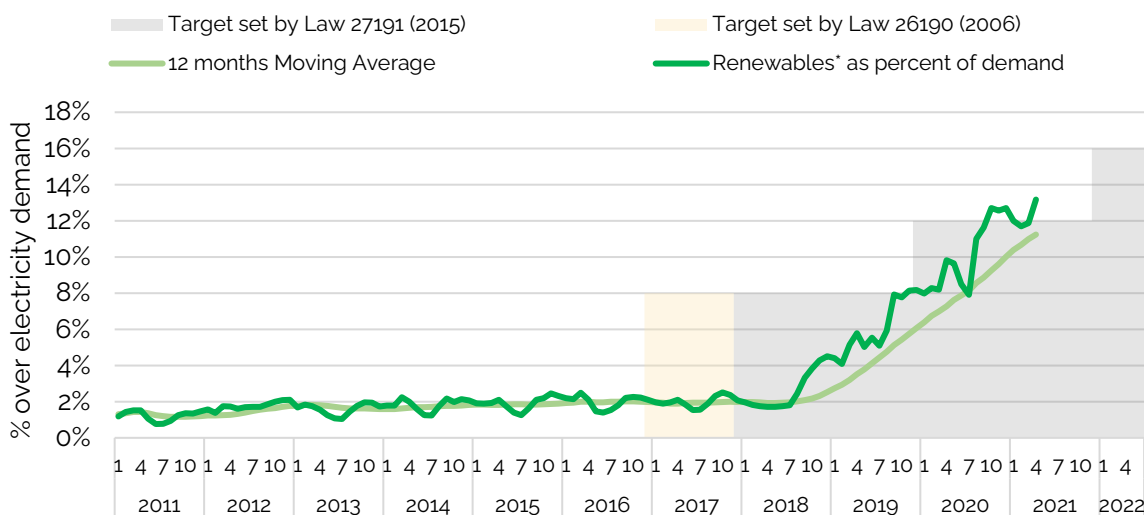
Por lo tanto, estos parámetros hacen del sector transporte un objetivo principal de cambio hacia un objetivo final de emisiones netas cero en 2050.

Generación de energía eléctrica

La ley 27.191 establece la incorporación de generación a partir de fuentes renovables como la eólica, solar, biomasa y pequeñas centrales hidroeléctricas, que en el último año móvil a la fecha de realización de este trabajo representaban el 11,8% de la generación total, totalizando junto con las otras fuentes libres de emisiones el 35% de la generación.

La Figura 10 a continuación ilustra la incorporación de generación a partir de fuentes renovables contempladas en la Ley 27.191 entre 2011 y abril de 2021.

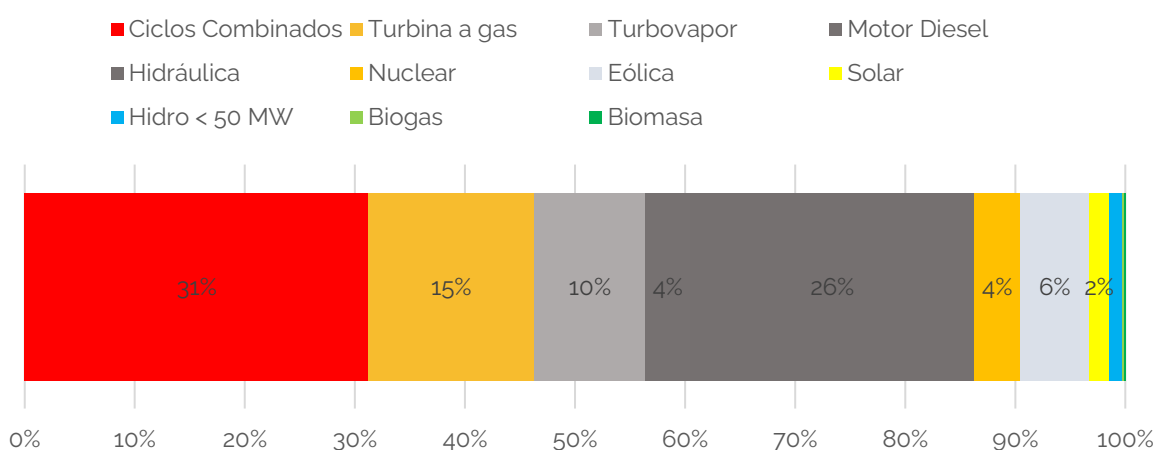
Figura 10: Generación de energía a partir de fuentes renovables, excluyendo gran hidroelectricidad



Fuente: Elaboración propia sobre la base de datos de CAMMESA y legislación vigente

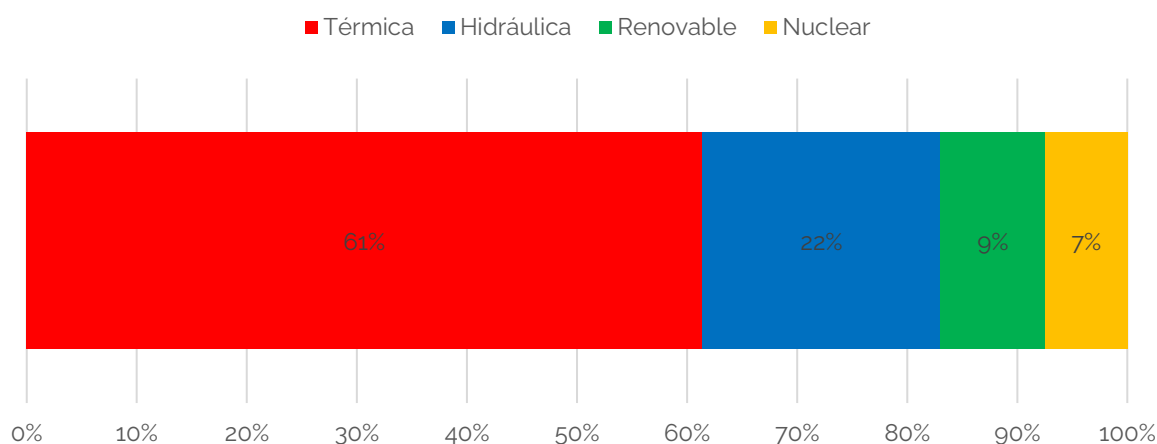
En la Figura 11 siguiente se ilustra la composición de la potencia total instalada en el país, prevaleciendo la electricidad proveniente de máquinas térmicas, seguido de la gran hidroelectricidad, y luego renovables, que han crecido notablemente en el último quinquenio.

Figura 11: Potencia instalada por tecnología, año 2020



Fuente: Elaboración propia sobre la base de datos de CAMMESA

Figura 12: Generación eléctrica por fuente, año 2020



Fuente: Elaboración propia sobre la base de datos de CAMMESA

1.2. Estado Final del Sistema (E_f)

Para alcanzar la carbono neutralidad en el año 2050, las emisiones netas de carbono de la República Argentina deben ser nulas, por lo que habrá que seleccionar las características que deberían tener las trayectorias compatibles con el cumplimiento de ese objetivo, llevando a la mínima expresión posible las emisiones provenientes del sector energético.

Se da comienzo desde un estado inicial donde la participación de los combustibles fósiles es abrumadoramente preponderante, y en los próximos 30 años las trayectorias a seguir son extremadamente exigentes, obligando a **electrificar el 60% del consumo de energía final en el sector transporte, cerca del 95% en los sectores residencial, comercial y cerca del 80% del consumo final industrial**, en escenarios que agregarán demanda a la producción de energía eléctrica que en más del 60% se realiza quemando fósiles. Por lo tanto, los fósiles deberán ser sustituidos por medios de producción no emisores de GEI, incluyendo hidroelectricidad, nucleoelectricidad, energías renovables no convencionales, como la eólica, la solar y la biomasa. Asimismo, se deberán abordar nuevos modelos de negocios que reemplacen las funciones que actualmente brindan las empresas de servicios públicos de electricidad, por nuevas funciones con mayores niveles de descentralización, creando la figura del productor-consumidor.

Los consumos que no puedan ser electrificados deberán, en consecuencia, para cumplir con estos requisitos, provenir de fuentes libres o extremadamente bajas en emisiones de GEI.

Por lo tanto, este escenario requiere en forma simplificada que:

- La mayoría de los vehículos del parque automotor liviano deben convertirse a energía eléctrica;
- Todo el consumo de gas y GLP en el sector residencial y comercial debe sustituirse por en consumo eléctrico;
- Las mejoras de eficiencia con relación a un escenario tendencial de demanda deben ser al menos del 20%;
- La generación eléctrica libre de emisiones debe alcanzar más del 90% del total de electricidad producida.

1.2.1. *Generación de energía eléctrica en base a renovables*

Para poder descarbonizar por completo los consumos del sector energético y de los distintos sectores de la economía, resultan imprescindibles profundas transformaciones que permitan que la electricidad sustituya completamente a los combustibles fósiles. Sin embargo, la electricidad tiene que ser producida mediante fuentes no emisoras de GEI, de las cuales sobresalen actualmente en términos de participación la hidroelectricidad y la nucleo-electricidad. En el futuro, la ley 27.191 establece que el 20% del consumo de energía eléctrica debe provenir de fuentes renovables como la eólica, solar, biomasa y pequeñas centrales hidroeléctricas.

Como se señaló anteriormente, la electricidad representa el 20% del consumo de energía final. Esta participación deberá crecer sostenidamente hasta el 2050, pasando a ser la primera fuente de energía secundaria que alimente la demanda en ese momento.

Además de incrementar su participación, este crecimiento deberá ser totalmente neutro en emisiones de GEI, privilegiando fuentes de producción que actualmente son minoritarias en el Balance de Energía Eléctrica.

Los objetivos de emisiones netas nulas sólo son compatibles con la electrificación de los usos y la producción de energía eléctrica con medios no emisores de GEI. La electrificación de los usos en transporte y vivienda agregarán demanda sobre la trayectoria tendencial y en los escenarios de electrificación y de eficiencia energética a partir de cambios de conducta, debe ser tenida en cuenta y computada al evaluar los recursos que deben ser puestos en juego.

En el documento de trabajo sobre descarbonización profunda para el sector eléctrico (Rabinovich, Caratori, IAE/ITDT, 2017) se realizó una primera cuantificación con la información disponible al momento de su elaboración que preveía la incorporación de 3.150 MW hidroeléctricos, 1.900 MW nucleares, y 17.000 MW eólicos y solares, hasta el año 2030. En total, la capacidad instalada en base a medios renovables es del orden de los 20.000 MW.

Las proyecciones continúan hasta el año 2050, con el objetivo de que toda la capacidad de generación de energía eléctrica no emita GEI. Entre 2030 y 2050 se incorporaban los proyectos hidroeléctricos binacionales con Brasil y Uruguay (3.100 MW para Argentina) y una nueva central hidroeléctrica cada tres años a partir de 2038, de una capacidad aproximada de 600 MW, hasta completar el recurso hídrico disponible de acuerdo con los inventarios existentes. De esta forma la hidroelectricidad aportaría cerca de 6.000 MW adicionales. Adicionalmente, se agrega una nueva central nuclear cada seis años a partir de 2033 con una capacidad adicional total de 3.000 MW.

Pero para alcanzar el objetivo de tener un parque de generación eléctrico descarbonizado, es decir neutro en emisiones, el rol principal a partir de 2030 lo asumen los emprendimientos eólicos, que según la obra citada deberían incorporar una capacidad de 30.000 MW, y fundamentalmente la energía solar que debería aportar 75.000 MW. En este último caso solamente será posible mediante fuertes incentivos a la generación distribuida, impulsando masivamente la figura de los productores-consumidores.

Este sistema mantiene equipamiento con combustibles fósiles en concepto de reserva y seguridad de abastecimiento, pero con una participación mínima en la matriz de generación eléctrica en 2050.

Con estas cifras, la energía eléctrica ocuparía en el esquema de abastecimiento de energía primaria el 25% del total, lo que hace imprescindible que el 75% restante sea sustituido en los sectores de transporte, viviendas e industria. Ello agregará demanda sobre la producción de electricidad, la que habrá que considerar si requiere la incorporación de medios de producción adicionales, en un escenario de máxima eficiencia energética.

Una rápida estimación arroja inversiones del orden de los 6 mil millones de dólares por año hasta el 2030, de los cuales el 50% corresponde a centrales eólicas y solares⁴⁴. Pero a partir de entonces y hasta el 2050, considerando una caída del costo unitario de las energías renovables no convencionales, las inversiones anuales promedio deberían alcanzar los 8.250 millones de dólares por año, de las cuales dos tercios corresponden a centrales eólicas, solares y generación distribuida en base a energías renovables.

Estas inversiones no tienen en cuenta las requeridas en los sistemas de transmisión y distribución, que deben acompañar los cambios propuestos.

El presente trabajo se monta sobre dicha cuantificación inicial, realizando estimaciones adicionales y de precisión para los escenarios en los cuales se incrementa la electrificación de los usos finales energéticos en todos los sectores.

1.2.2. Electromovilidad

En 2020, 10 millones de vehículos eléctricos (EV) ya formaban parte del parque automotor mundial, y las ventas de EV ese año representaron el 4,6% de las ventas totales. A pesar de la pandemia COVID 19 las iniciativas tendientes a promover una aceleración en la penetración de los vehículos eléctricos se multiplicaron.

De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía, siguiendo una trayectoria compatible con su escenario de Desarrollo Sostenible (SDS, por sus siglas en inglés) en el año 2030, el parque mundial de EV debe alcanzar los 230 millones de vehículos⁴⁵. Este crecimiento debe ir acompañado por la infraestructura necesaria para la carga, y la reducción del costo de las baterías (Japón, 100 usd/kWh en 2030).

El escenario SDS plantea emisiones netas cero en 2070, compatible con un incremento de la temperatura media global de 1.7 – 1.8 ° C con un 67% de probabilidades. Además, se alcanzan todas las metas, asumiendo que un grupo de 30 países signatarios (EV30@30 signatories) logran que en 2030 el 30% de las ventas de vehículos livianos corresponda a autos eléctricos, y que en el caso de buses y vehículos pesados esta participación llegue hasta el 35%.

Un aspecto a ser resuelto es el de la infraestructura de carga, donde las previsiones consisten en recomendar un cargador por EV en el parque automotor. Para 230 millones de EV en 2030, la capacidad eléctrica requerida alcanza 1.2 TW aproximadamente, arrojando un promedio de alrededor de 6 kW por EV.

Otro componente relevante consiste en la capacidad de producción de baterías. La capacidad de producción planificada anunciada de baterías de vehículos eléctricos equivale aproximadamente a 3,2 TWh para 2030. Esta capacidad es suficiente para satisfacer necesidades de batería de los objetivos del SDS si todas las plantas de fabricación de baterías funcionan a plena capacidad (actualmente operan a aproximadamente el 50% de su capacidad). Por otra parte, se necesitan al menos cinco años desde la construcción de una nueva fábrica de baterías hasta la producción a la máxima capacidad. Por lo tanto, para el SDS deben realizarse esfuerzos para asegurar que toda la capacidad de producción anunciada se construya a tiempo y que las fábricas logran aumentar rápidamente sus factores de utilización de la capacidad instalada.

La demanda de electricidad proyectada al 2030, en el SDS alcanzaría los 860 TWh, lo que representa aproximadamente el 2% de la demanda de electricidad mundial ese año. Esta demanda desplazará a 3,5 millones de barriles/día de petróleo.

Las barreras para la adopción de vehículos eléctricos siguen siendo significativas. La falta de infraestructura de carga es la barrera más importante (especialmente en Estados Unidos y el Reino Unido). También la falta de disponibilidad de distintos tipos de vehículos y el elevado precio de compra de los vehículos eléctricos siguen siendo obstáculos importantes. Para superar estas barreras, el 71% de los miembros de EV100⁴⁶ apoyan beneficios fiscales de adquisición de vehículos eléctricos más favorables y el 70% favorece políticas de apoyo a nivel de gobierno estatal, regional y municipal. 60% de las empresas miembros apoyan los objetivos gubernamentales de eliminar gradualmente los vehículos que consumen gasolina y diésel.

Existe una batería de políticas, regulaciones e incentivos de implementación en el mundo, entre las que se pueden mencionar⁴⁷:

- Regulaciones para vehículos livianos cero emisiones (ZEV): mandatorias en algunos estados de Canadá, China y los Estados Unidos;
- Estándares de eficiencia en Canadá, China, Estados Unidos, la Unión Europea, India y Japón, que deben alcanzar aproximadamente los 5 litros/100 kilómetros entre 2020 y 2022⁴⁸;
- Incentivos Fiscales en todos estos países para la adquisición de ZEV;
- Regulaciones e incentivos fiscales para la infraestructura de carga:

En China, en las 20 mayores ciudades los incentivos para vehículos ZEV pueden clasificarse en: circulación sin restricciones; menor costo o libre estacionamiento; subsidios al uso de la infraestructura de carga; subsidios directos a la compra de ZEV; y electrificación total de la flota de buses de transporte de pasajeros (2019-2025).

1.2.3. Eficiencia energética

La mayor parte de los escenarios futuros y de los diálogos realizados en el marco de este Proyecto con los actores involucrados muestran que la eficiencia energética es un supuesto subestimado en la Argentina, quedando limitado a la ejecución de una serie de acciones, con

tecnologías disponibles hoy en el mercado sin considerar innovaciones y rupturas que podrían modificar la forma en la que se consume la energía, respecto de una política integral que permita alcanzar objetivos más ambiciosos. Dada la multiplicidad de actores (consumidores, productores, empresas de servicios), las decisiones son más de carácter descentralizado y privado que el resultado de una política desde el Estado. Sin embargo, éste en sus distintos niveles es el encargado de orientar y favorecer los incentivos para que la toma de este tipo de decisiones se oriente hacia los objetivos buscados.

En los escenarios energéticos al 2030⁴⁹ publicados en 2019 por la Secretaría de Energía (SE), el consumo de energía final en un escenario de eficiencia energética crecería a una tasa del 1,4% anual acumulado, contra un escenario base casi 60% mayor. Partiendo de un Consumo de Energía Final en 2018 de 53,2 Mtep se llegaría en un escenario eficiente a 63,1 Mtep, ahorrándose 5,8 Mtep respecto del escenario base con una elasticidad implícita de 0,47, es decir que por cada punto de crecimiento del PIB el consumo de la energía final debe crecer medio punto.

El escenario eficiente recoge acciones que forman parte del Plan Nacional de Energía y Cambio Climático:

- Eficiencia en electro y gasodomésticos;
- Incremento del uso de LED en el parque de iluminación;
- Bombas de calor, desplazando calefactores a gas natural;
- Alumbrado público: recambio completo progresivo de luminarias públicas al año 2030,
- Optimización de energía en la Industria;
- Cogeneración;
- Eficiencia en calefones y termotanques;
- Transporte urbano e interurbano;
- Recuperación del sistema ferroviario, transporte urbano sustentable,
- Etiquetado vehicular asociado a la definición de estándares mínimos de eficiencia energética.
- Promoción de nuevas tecnologías y resto de acciones.

Sin embargo, en este escenario eficiente cambia muy poco la estructura de consumo en 2030, manteniéndose el gas natural como la fuente de mayor preponderancia en el sector residencial e industrial, 57% y 42% respectivamente; los combustibles líquidos en el transporte mantienen una participación cercana al 70%, mientras que el gas natural avanza al 21% y la energía eléctrica crece marginalmente en la industria y el sector residencial y es casi imperceptible en el transporte.

Este escenario eficiente es muy ambicioso en términos de acciones a llevar a cabo para poder concretarlo, pero se encuentra muy lejos de posibilitar que en 2050 Argentina pueda alcanzar

emisiones netas cero que comprometió ante la comunidad internacional. En este sentido es necesario avanzar con metas más ambiciosas al 2030, 2040 para llegar con posibilidades de estar cerca de este objetivo al 2050.

En un escenario donde se avanza en la modificación de las estructuras de consumo, denominado escenario de electrificación, la electricidad pasa a ser predominante en el sector residencial, aunque el gas natural sigue representando una porción importante del consumo, y crece ligeramente en la industria y el transporte. No obstante, sigue siendo un escenario completamente insuficiente respecto del objetivo de la carbono neutralidad al 2050.

Una de las recomendaciones del Proyecto de Eficiencia Energética en la Argentina⁵⁰ es describir el mercado argentino de servicios de eficiencia energética. Dicho ejercicio —estudio de mercado— debe reflejar la situación existente y establecer el cumplimiento de mejoras. Actualmente se puede decir que este mercado es prácticamente inexistente.

Dada la diversidad de sectores a considerar, la ausencia de un mercado de empresas de servicios energéticos (ESE) en el país y la multiplicación de actores individuales, se hace imprescindible promover mediante una política apropiada de incentivos la formación de una industria especializada en estos temas para lograr ahorros y reducciones del consumo energético, además de actuar sobre normativas regulatorias.

Si en un escenario poco ambicioso como el descrito anteriormente, donde los combustibles fósiles siguen predominando ampliamente en la estructura de consumo final se consiguieran realizar ahorros por 5,8 millones de Tep en 2030, es decir aproximadamente 41,8 millones de barriles y estimando un precio promedio en ese momento de 60 USD/barril, el ahorro se estima en una suma de 2.500 millones de USD que permitiría promover acciones de eficiencia y ahorro energético. Claramente, esta disponibilidad de financiamiento crece con las ambiciones de ahorro y eficiencia que podrían ser derivadas por distintos mecanismos a una nueva industria de eficiencia direccionada al sector residencial, al comercial, al transporte y a la industria.

En los Estados Unidos de Norteamérica, por ejemplo, el tamaño de mercado de ESE ha evolucionado desde los 2.000 millones de dólares en el año 2000 a los 7.500 millones de dólares previstos en el año 2014 (Laurence Berkeley Laboratory, 2013).

Según la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés), el mercado global de ESE supera los 12 mil millones de dólares sin embargo el mercado potencial es superior a los 100 mil millones de dólares (12% del potencial). El volumen del mercado a nivel global se encuentra por debajo de las expectativas en comparación con el potencial de mercado y las proyecciones,

esta lenta evolución se evidencia también en los países de ALC⁵¹. Sin embargo, los compromisos de reducción de emisiones aceleran rápidamente esta evolución.

Los modelos Contractuales básicos para el desenvolvimiento de las ESE's pueden clasificarse en:

- Contratos de Desempeño Energético (EPC);
- Contratos de Suministro de Energía (ESC);

Pueden darse variantes sobre estos modelos, tales como los contratos por prestaciones o los contratos de construcción, operación y transferencia (BOOT).

Una restricción importante observada es la incapacidad del sector público de desarrollar contratos de servicios energéticos bajo cualquiera de sus modalidades. Estas empresas en países como la Argentina operan en un umbral de inversiones bajo (inversiones que en promedio están por debajo de los 100.000 dólares con escasos ejemplos de inversiones que superan los 1.000 dólares)⁵². Las inversiones se encuentran dentro de lo previsible para un mercado no desarrollado (proyectos pequeños y medianos con períodos de repago cortos con el propósito de diversificar su riesgo).

El potencial de la eficiencia energética es significativo para alcanzar los objetivos de emisiones netas cero, pero para poder desarrollarlo, la creación de una industria de estas características en la Argentina es indispensable.

3. Metodología y desarrollo de escenarios – AFOLU

Síntesis metodológica

1 Cultivos agrícolas

En la categoría suelos agrícolas las emisiones de GEI provienen de tres fuentes principales:

- residuos de cosecha,
- fertilizantes sintéticos, y
- carbono del suelo.

Las acciones de mitigación aquí propuestas están interrelacionadas y procuran minimizar las emisiones de carbono en el suelo mediante la mayor producción anual de carbono de la biomasa

vegetal. Esto está directamente relacionado con las secuencias de cultivos (rotaciones), la presencia de gramíneas en la rotación, tanto como cultivos de cosecha como de cobertura (o cultivo de servicios).

Por lo tanto, en primer lugar, las rotaciones de cultivos determinan las emisiones o capturas de carbono en el suelo. En segundo lugar, el uso de fertilizantes nitrogenados genera emisiones que pueden ser en gran parte reducidas mediante el uso de inhibidores de la volatilización de la urea. Esta tecnología permite aumentar los rendimientos mediante un uso creciente de fertilizantes obteniendo mayor biomasa vegetal, sin generar un aumento proporcional de las emisiones.

Finalmente, el uso de tecnologías PGPR permitiría incrementar la biomasa vegetal sin generar emisiones adicionales, lo cual tendría un efecto positivo sobre el balance de carbono en el suelo y una disminución de la intensidad de emisiones por unidad de producto.

1.1. Criterios utilizados para la estimación preliminar proyectada de mitigación y costos para cultivos agrícolas al 2050

Para la estimación de escenarios de mitigación se proyectó un incremento interanual de la producción agrícola del 2,3%, asumiendo que el 50% corresponde a aumento del área cultivada y el 50% restante a mejoras en los rendimientos por unidad de superficie. Asimismo, se tomó un incremento del 2,3% interanual en el uso de fertilizantes nitrogenados. Para esto último, la proyección asume que se mantendría una participación de urea/UAN del 70% sobre el total de nitrógeno aplicado como fertilizante sintético.

Las emisiones por uso de fertilizantes se distribuyen en dos:

- El CO₂ liberado por hidrólisis de la urea
- Las emisiones directas de N₂O por deposición atmosférica e indirectas por lixiviación o escurrimiento.

La fracción de lixiviación prácticamente no aplica en Argentina ya que, en promedio, las lluvias no superan la evapotranspiración. Por lo tanto, la emisión de N₂O sería mitigada por el uso de inhibidores que reducen la fracción de volatilización (Frac Gas^{f53}).

La proyección utiliza como valores iniciales los datos de actividad del BUR 2016 (Tabla 21). Las medidas de mitigación referidas a inhibidores de la volatilización de la urea y adopción de tecnologías PGPR, se aplicaron sobre las emisiones totales asociadas a fertilizantes sintéticos y a la intensidad de emisiones por incremento de la producción por PGPR.

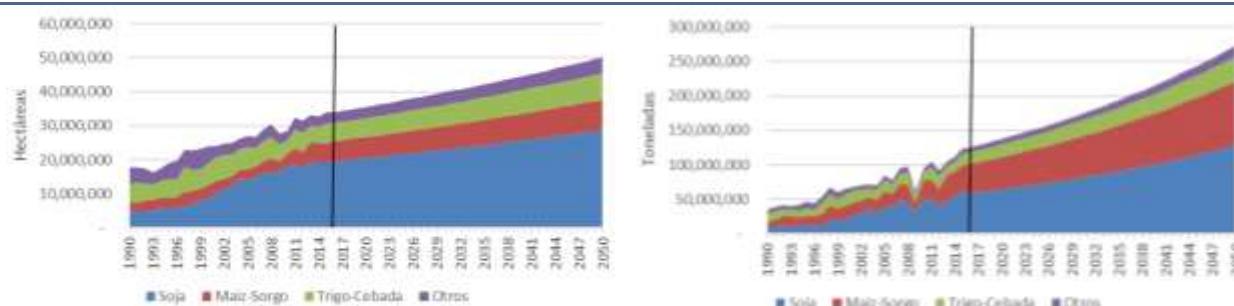
Tabla 21: Variables relacionadas a los Datos de Actividad de Cultivos agrícolas - Año 2016

Variable	Definición de la variable	Desagregación	Valor 2016
Superficie cultivos (ha)	Cantidad de hectáreas cosechadas total país	Trigo Cebada	5.313.923
		Maíz Sorgo	6.020.143
		Soja	19.504.648
		Caña de azúcar	394.100
		Otros	3.097.021
Superficies forrajeras (ha)	Cantidad de hectáreas con especies forrajeras total país	No aplica	9.333.935
Producción cultivos (toneladas)	Cantidad de toneladas producidas total país	Trigo Cebada	16.585.137
		Maíz Sorgo	42.822.184
		Soja	58.799.258
		Caña de azúcar	18.436.082
		Otros	7.174.990
Producción Forrajeras (toneladas)	Cantidad de toneladas producidas por forrajeras total país	No aplica	62.745.033
Rendimiento cultivos (tn/ha)	Cantidad de toneladas producidas por cultivos por hectárea total país	Trigo Cebada	3,12
		Maíz Sorgo	7,11
		Soja	3,01
		Caña de azúcar	46,78
		Otros	2,32
Rendimiento Forrajeras (tn/ha)	Cantidad de toneladas producidas por forrajeras por hectárea total país	No aplica	6,72
Porcentaje de doble cultivos (%)	Porcentaje de superficie destinada a doble cultivos	No aplica	SV
Relación cosechada/sembrada (%)	Relación entre la superficie cosechada y la superficie sembrada	No aplica	95
Nitrógeno aplicado total país (toneladas)	Cantidad de nitrógeno aplicado por fertilizantes sintéticos total país	No aplica	908.356
Nitrógeno aplicado por urea y UAN total país (toneladas)	Cantidad de nitrógeno aplicado por urea y UAN total país	No aplica	631.813
Porcentaje de nitrógeno aplicado por urea y UAN (%)	Proporción del de nitrógeno aplicado total proveniente de urea y UAN	No aplica	70
Fertilizante aplicado en cultivos (toneladas de N)	Cantidad de fertilizante nitrogenado aplicado por grupo en cultivos país	No aplica	10,68

Fuente: BUR 3 (MAyDS, 2016)

La Proyección de superficie cultivada y producción de los principales cultivos para el período 2017 al 2050 se detalla en la Figura 13.

Figura 13: Proyección de área cultivada y producción para los principales cultivos agrícolas, sin incluir caña de azúcar



Fuente: Elaboración propia

1.1.1. Contenido de carbono en suelos

El secuestro de carbono en suelos se encuentra relacionado con el tipo de suelo, el clima y la producción anual de biomasa y el sistema de labranza. La producción anual de biomasa depende del rendimiento de los cultivos y el tipo de cultivo. La participación de cereales en la rotación es de suma importancia en el balance de carbono de un suelo agrícola. La siembra directa y la intensificación por uso de fertilizantes e inclusión de dobles cultivos y/o cultivos de cobertura, favorece el aporte de carbono, dando lugar a balances "menos negativos", neutros o positivos. No obstante, no todas las regiones responden de la misma manera a estas prácticas.

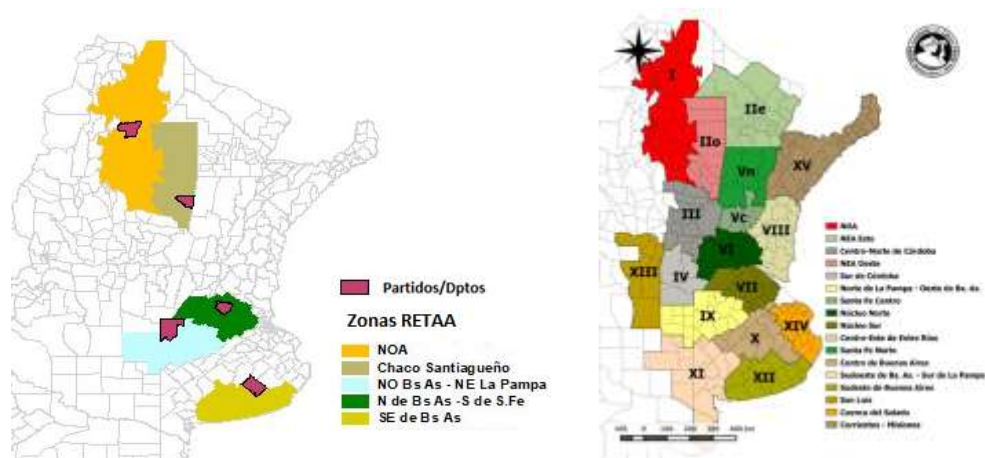
En Argentina, aproximadamente el 90% de la superficie de la agricultura extensiva se realiza en siembra directa. El crecimiento del cultivo de cereales y un uso creciente de fertilizantes, como así también el progreso genético medio anual, pueden dar lugar a aportes graduales de carbono al suelo. El balance de carbono edáfico será neutro si los aportes igualan a las pérdidas por mineralización. Este principio rige tanto para tierras de cultivo, como para tierras de pastoreo (pastizales y pasturas implantadas) y tierras forestales.

La metodología IPCC Nivel 1 para el cálculo de carbono en el suelo (que utiliza nuestro país) no es aplicable para proyectar el potencial de mitigación a nivel nacional ya que el método no es sensible a las rotaciones. Por esta razón, se utilizó el modelo de carbono AMG (Milesi Delaye et al., 2013) para estimar el efecto de las rotaciones de cultivos en 5 zonas, considerando sus respectivos rendimientos en grano y dosis de fertilizantes actualmente utilizadas.

Se seleccionaron 5 regiones de manera de cubrir condiciones contrastantes de suelo y clima. En estas se evaluó el efecto de las rotaciones contabilizando las emisiones totales de cultivo, por residuos de cosecha, uso de fertilizantes y balance de carbono del suelo.

La siguiente Figura 14 detalla la ubicación de los sitios de acuerdo con las regiones definidas por la Bolsa de Cereales de Buenos Aires para el Relevamiento de Tecnología Agrícola Aplicada (ReTAA).

Figura 14: Regiones RETAA de la Bolsa Cereales y localización de las zonas evaluadas



Fuente: Bolsa de Cereales de Buenos Aires

Las localidades y rendimientos de los cultivos se detallan en la Tabla 22.

Tabla 22: Rindes utilizados para las estimaciones de emisiones en localidades de cinco regiones del país

Cultivo y Rindes kg/ha	Gral. Villegas	Pergamino	Tandil	Rosario de la Frontera	Bandera
Región	NO Bs As	NE Bs As	SE Bs As	Salta	Stgo del Estero
Soja	3,000	3,500	2,600	3,000	3,000
Maíz	8,000	9,000	8,000	7,000	7,000
Trigo	3,800	4,500	5,000	2,000	2,000
Soja 2da	2,000	2,500	1,300	3,000	3,000

Fuente: En base a registros zonales de grupos CREA

Las rotaciones evaluadas se analizaron para un ciclo de 12 años (Tabla 23) y en todas se consideró la siembra directa como sistema de labranza.

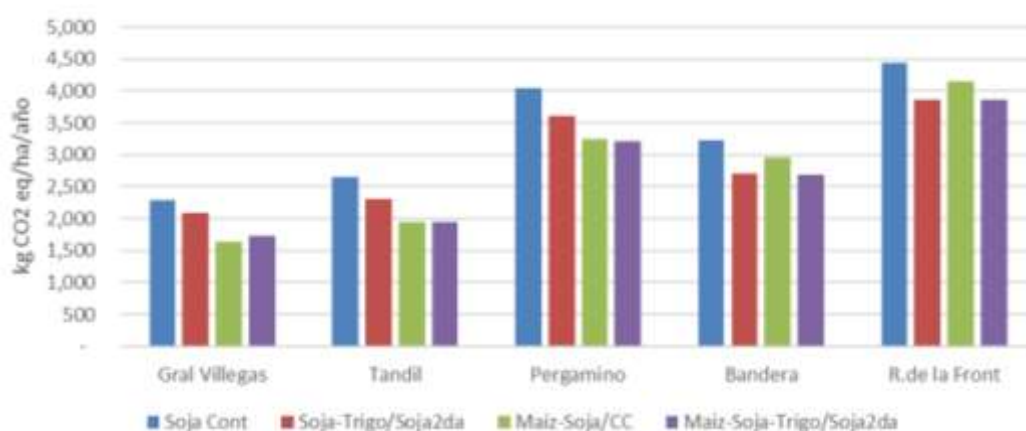
Tabla 23: Rotaciones de cultivos evaluadas

Secuencia de cultivos	% gramíneas	Ciclo (años)	Nro. de ciclos
Soja Continua	sin gramíneas	12	1
Soja-Trigo/Soja 2da	50%	2	6
Soja- Maiz /Cultivo de cobertura	50%	2	6
Soja- Maiz/Cebada -Trigo/Soja 2da	66%	3	4

Fuente: Elaboración propia utilizando una plataforma de cálculo de emisiones y modelo de carbono del suelo (plataforma PUMA).

Las emisiones totales en suelos agrícolas variaron en las distintas regiones del país debido a sus diferencias en suelo, clima y rendimientos por hectárea. La Figura 15 seguidamente muestra que el incremento de gramíneas tiene un efecto positivo sobre la disminución de emisiones totales por hectárea. Esta cuestión dificulta realizar una estimación o estrategia de mitigación para todo el territorio en cultivos extensivos, aunque pueden deducirse algunos lineamientos generales. Por ejemplo, incentivar la diversificación de cultivos y la rotación de oleaginosas con cereales y cultivos de cobertura tiene múltiples beneficios, entre ellos una reducción de las emisiones totales por hectárea, independientemente de las regiones productivas en el país.

Figura 15: Emisiones totales por residuos de cosecha, fertilizantes y carbono del suelo según rotaciones



Fuente: Elaboración propia

En cada rotación, la proporción de las fuentes de emisiones fueron diferentes debido a la mayor o menor participación de cereales y cultivos de cobertura. El monocultivo de soja tiene la fortaleza de tomar de la atmósfera aproximadamente el 70% de sus requerimientos de nitrógeno, no usando fertilizantes sintéticos. Sin embargo, sus residuos aéreos y subterráneos aportan menos carbono al suelo que los cereales. En tanto que los cereales requieren el uso de fertilizantes nitrogenados, y sus emisiones directas e indirectas asociadas, pero aportan una mayor cantidad de carbono al suelo en los residuos de cosecha. Las Tabla 24 a Tabla 25 a continuación presentan el detalle de las emisiones por hectárea de las 4 rotaciones evaluadas en las cinco zonas seleccionadas.

Tabla 24: Emisiones estimadas por rotación para la localidad de Gral. Villegas – Buenos Aires

Cultivo en rotación	Soja Cont.	Soja – Trigo / Soja 2da	Soja- Maiz /Cultivo de cobertura	Maíz – Soja – Trigo / Soja 2da
Emisiones por residuos de cosecha (kg CO ₂ e)	161	247	436	402
Emisiones por Fertilizantes Sintéticos (kg CO ₂ e)	117	507	507	637
Emisiones y absorciones por balance de carbono en suelos (kg CO ₂ e)	2.006	1.339	701	692
Total emisiones (kg CO₂e/año)	2.283	2.093	1.644	1.739

Nota: rotaciones promedio ciclo de 12 años

Fuente: Elaboración propia

Tabla 25: Emisiones estimadas por rotación para la localidad de Tandil – Buenos Aires

Cultivo en rotación	Soja Cont.	Soja – Trigo / Soja 2da	Soja- Maiz /Cultivo de cobertura	Maíz – Soja – Trigo / Soja 2da
Emisiones por residuos de cosecha (kg CO ₂ e)	146	257	429	408
Emisiones por Fertilizantes Sintéticos (kg CO ₂ e)	117	507	507	637
Emisiones y absorciones por balance de carbono en suelos (kg CO ₂ e)	2.393	1.535	1.010	899
Total emisiones (kg CO₂e/año)	2.656	2.299	1.945	1.944

Nota: rotaciones promedio ciclo de 12 años

Fuente: Elaboración propia

Tabla 26: Emisiones estimadas por rotación para la localidad de Pergamino – Buenos Aires

Cultivo en rotación	Soja Cont.	Soja – Trigo / Soja 2da	Soja- Maiz /Cultivo de cobertura	Maíz – Soja – Trigo / Soja 2da
Emisiones por residuos de cosecha (kg CO ₂ e)	179	283	461	436
Emisiones por Fertilizantes Sintéticos (kg CO ₂ e)	117	507	507	637
Emisiones y absorciones por balance de carbono en suelos (kg CO ₂ e)	3.743	2.814	2.278	2.147

Total emisiones (kg CO₂e/año)	4.039	3.604	3.246	3.220
---	--------------	--------------	--------------	--------------

Nota: rotaciones promedio ciclo de 12 años

Fuente: Elaboración propia

Tabla 27: Emisiones estimadas por rotación para la localidad de Bandera - Santiago del Estero

Cultivo en rotación	Soja Cont.	Soja – Trigo / Soja 2da	Soja- Maiz /Cultivo de cobertura	Maíz – Soja – Trigo / Soja 2da
Emisiones por residuos de cosecha (kg CO₂e)	93	127	117	132
Emisiones por Fertilizantes Sintéticos (kg CO₂e)	32	130	180	196
Emisiones y absorciones por balance de carbono en suelos (kg CO₂ e)	3.107	2.439	2.661	2.365
Total emisiones (kg CO₂e/año)	3.232	2.697	2.958	2.693

Nota: rotaciones promedio ciclo de 12 años

Fuente: Elaboración propia

Tabla 28: Emisiones estimadas por rotación para la localidad de Rosario de la Frontera - Salta

Cultivo en rotación	Soja Cont.	Soja – Trigo / Soja 2da	Soja- Maiz /Cultivo de cobertura	Maíz – Soja – Trigo / Soja 2da
Emisiones por residuos de cosecha (kg CO₂e)	93	127	117	132
Emisiones por Fertilizantes Sintéticos (kg CO₂e)	32	130	180	196
Emisiones y absorciones por balance de carbono en suelos (kg CO₂ e)	4.316	3.599	3.848	3.526
Total emisiones (kg CO₂e/año)	4.441	3.857	4.145	3.854

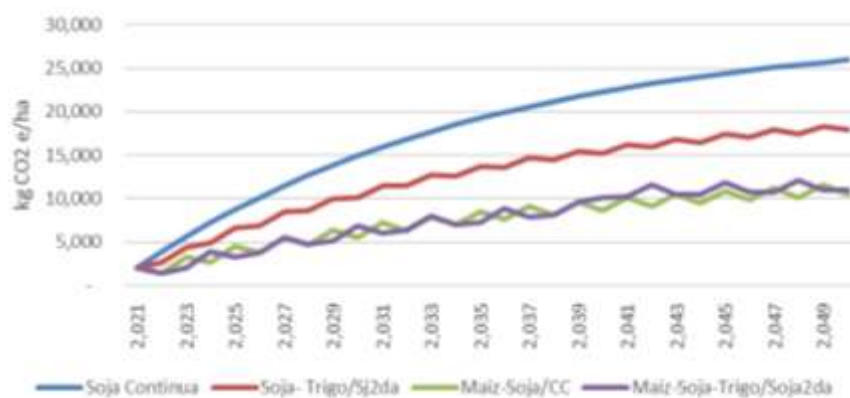
Nota: rotaciones promedio ciclo de 12 años

Fuente: Elaboración propia

Con relación a las emisiones y absorciones del carbono del suelo, se analizaron las diferencias entre rotaciones para las distintas localidades considerando un período de 30 años (2021-2050). La presenta la evolución de las emisiones "acumuladas" provenientes de cambios en el stock de carbono del suelo (0- 30 cm), para la zona de Gral. Villegas, comparando las cuatro rotaciones. Las menores pérdidas corresponden a las rotaciones con mayor proporción de gramíneas, siendo la "soja continua" la secuencia con mayores pérdidas de carbono orgánico del suelo. Esta estimación no contempla incrementos de rendimiento y proyecta las emisiones de acuerdo con

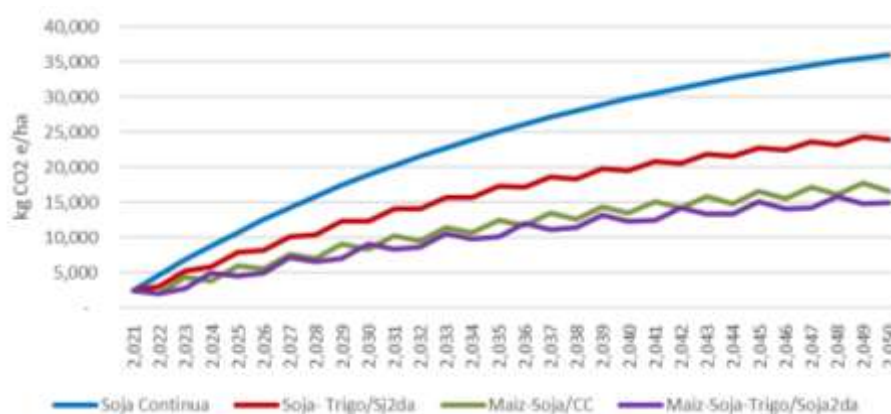
los rendimientos y niveles actuales de fertilización. La Figura 16 y Figura 17 repiten el mismo patrón para localidad de Tandil (sudeste de Buenos Aires) y Rosario de la Frontera (Salta).

Figura 16: Emisiones acumuladas, provenientes de cambios en el stock de carbono en el suelo (0-30 cm) según rotación - Gral. Villegas



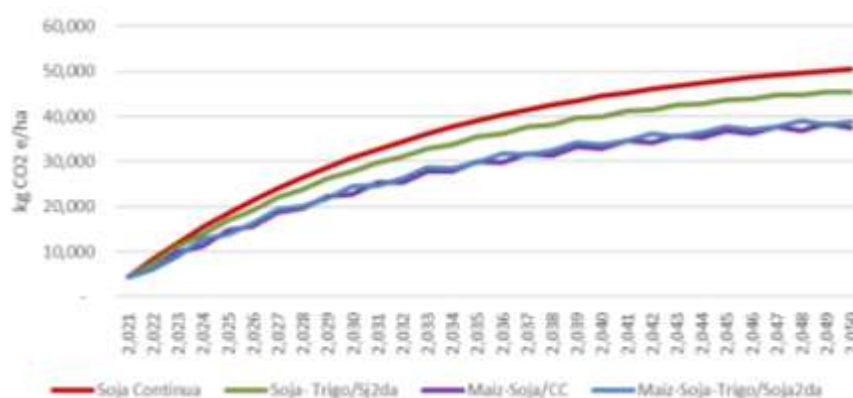
Fuente: Elaboración propia

Figura 17: Emisiones acumuladas, provenientes de cambios en el stock de carbono en el suelo (0-30 cm) según rotación- Tandil



Fuente: Elaboración propia

Figura 18: Emisiones acumuladas, provenientes de cambios en el stock de carbono en el suelo (0-30 cm) según rotación- R. de la Frontera



Fuente: Elaboración propia

Un trabajo recientemente publicado realizado por investigadores INTA y FAO (FAO, 2021) para nuestro país, discute algunos valores de captura potencial de carbono en el suelo, a nivel nacional, para escenarios hipotéticos de incrementos en la producción de biomasa en tierras de cultivo y de pastoreo. El estudio se llevó a cabo dentro del proyecto "Global Soil Organic Carbon Sequestration Potential National Map". Los autores utilizaron el modelo RothC para estimar una potencial evolución del carbono edáfico para tres escenarios de manejo sostenible del suelo para el periodo 2020-2040. Se comparó una línea de base (BAU) con las prácticas actuales, con tres escenarios de aportes crecientes de carbono del 5 % (SSM1), 10% (SSM2), y 20% (SSM3), en tierras de cultivo y de pastoreo. El escenario BAU presentó la máxima pérdida anual de carbono, siendo menores las pérdidas de carbono edáfico en los escenarios SSM1 y SSM2 y alcanzando un secuestro absoluto en el escenario SSM3, para un incremento del aporte del 20%.

Los autores concluyen que los resultados sugieren que los sistemas agrícolas (cultivos y tierras de pastoreo) son actualmente una fuente de CO₂ en lugar de un sumidero de carbono a nivel nacional. Un aumento de las entradas de carbono de un 5 a un 10% no sería suficiente para lograr una captura neta de carbono (saldo positivo) en el futuro. No obstante, se puede obtener un potencial de secuestro de 4.2 a 16.7 Mt carbono año⁻¹. utilizando prácticas de manejo sostenible (SSM3) en comparación con las prácticas del escenario base BAU. Según el estudio, una amplia adopción de prácticas de manejo que incrementen la biomasa anual (inputs de carbono) podría mitigar alrededor entre 11% y el 48% de las emisiones agrícolas nacionales anuales actuales.⁵⁴

⁵⁴ Este trabajo está realizado a una escala global, pero dado su actualidad vale la pena ser considerado.

De acuerdo a metodologías distintas de estimación, el incremento de la biomasa por unidad de superficie generaría una reducción de las emisiones por cambios en el stock de carbono en el suelo, tanto en cultivos agrícolas como en forrajeras.

La cuestión es poder realizar una proyección con modelos considerando las variables sitio específicas de clima y suelo, conforme a los incrementos asumidos en este estudio y la proporción de cereales y oleaginosas en rotación.

Considerando los incrementos por hectárea proyectados al 2050 se podría estimar un rango de reducción de emisiones en base a la literatura y modelos, dando como factibles aumentos del 26% y 40% para los periodos 2020-2040 y 2020-2050 (Tabla 29 y Tabla 30). Considerando estos escenarios como plausibles, podría considerarse el estudio de FAO-INTA mencionando previamente como un rango de potencial reducción de emisiones en el carbono en el suelo. Los autores del estudio proponen una reducción entre 4.2 y 16.7 MtCO₂/año. Estos valores equivaldrían a un 3.4 % y 12.3 % respectivamente con respecto a las emisiones totales del sector AFOLU de 135.5 MtCO₂e al 2016.

No obstante, debe refinarse esta estimación, teniendo en cuenta las diferencias regionales mencionadas previamente y su relación con la proporción de gramíneas en rotación.

Tabla 29: Incrementos de rendimiento y producción de forraje por periodos al 2050

	2020	2030	2040	2050
Cultivos totales (tn/ha)	4,39	4,92	5,51	6,18
Especies Forrajeras (tn/ha)	7,04	7,89	8,84	9,92

Fuente: Elaboración propia

Tabla 30: Incrementos por periodos de la producción de biomasa proyectada

	2020-2030	2020-2040	2020-2050
Cultivos totales	12%	26%	41%
Forrajeras	19%	26%	41%

Fuente: Elaboración propia

1.1.2. Carbono en suelo: Aplicación de Biochar

La estimación de escenarios de adopción de Biochar y sus costos han sido evaluada en forma individual debido a la complejidad de su implementación debido a que implica condiciones para su producción además de su posterior aplicación como enmienda.

Para la elaboración de los escenarios de aumento del contenido de carbono del suelo con biochar se identificaron variables clave específicas para Argentina y se recopilaron y analizaron sus estadísticas históricas:

- Superficie sembrada y superficie cosechada (hectáreas) por tipo de cultivo
- Producción de cultivos (toneladas) por tipo de cultivo
- Valor agregado bruto en el sector de los cultivos agrícolas (precios constantes en moneda local)
- Valor bruto de la producción en el sector de los cultivos agrícolas (precios constantes en moneda local)
- Puestos de trabajo registrados en el sector de los cultivos agrícolas (número de puestos de trabajo), cuando estén disponibles
- Empresas activas en el sector de los cultivos agrícolas (número de empresas), cuando estén disponibles.

Tabla 31: Participación por tipo de cultivo – Año 2018

<i>Cultivo</i>	Porcentaje de área cultivada
<i>Oleaginosas</i>	38.5%
<i>Cereales</i>	30.4%
<i>Cultivos forrajeros</i>	21.2%
<i>Bosques y bosques implantados</i>	3.3%
<i>Cultivos Industriales</i>	2.4%
<i>Frutales</i>	1.4%
<i>Leguminosas</i>	1.0%
<i>Hortalizas</i>	0.4%
<i>Aromáticas, medicinales y especias</i>	0%
<i>Invernadero</i>	0%
<i>Flores</i>	0%
<i>Otros</i>	1.5%

Fuente: Censo Nacional Agrícola (2018)

Para el año 2020, no hay ningún proyecto de biocarbón a gran escala implementado ni proyectos planificados a desarrollar en Argentina.

En Argentina, en el sector agropecuario, el Biocarbón tendría como uso principal la aplicación en suelos degradados por un alto número de laboreos, como los cultivos hortícolas intensivos, y suelos no degradados de producción intensiva de frutales. Asimismo, su uso podría extenderse a grandes superficies de suelos degradados de uso agrícola o ganadero. En estos últimos, el uso del biocarbón podría ser más restringido debido a la relación costo-beneficio. A los efectos de la estimación, sólo se considerará la zona de frutales para la potencial implantación del biocarbón a gran escala.

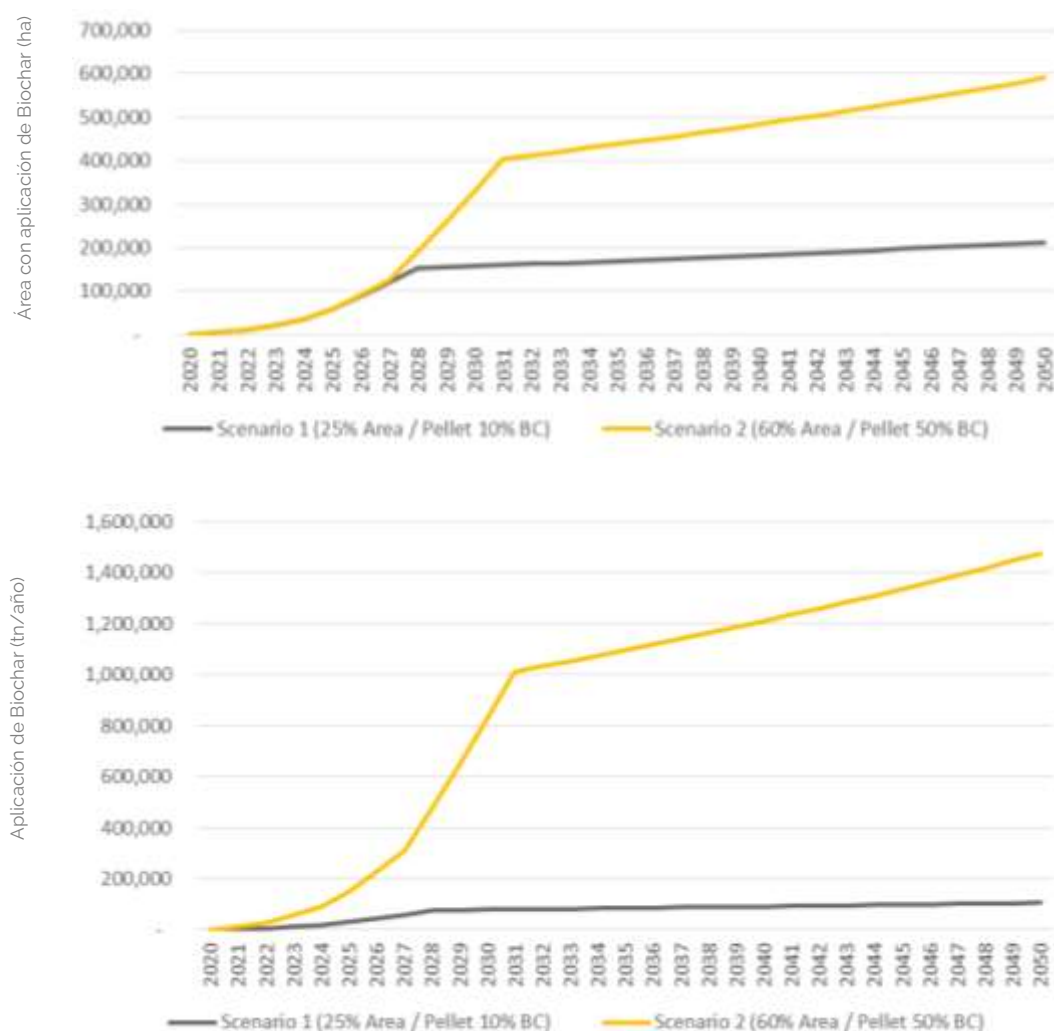
En Argentina hubo más de 530 mil hectáreas de frutales plantadas en el año 2016, según indican los informes bienales de actualización 3 (BUR3) de 2019. La plantación de frutales cubrió el 1,4% de la superficie total plantada, con más de 500 mil has, mostrando la mayor concentración geográfica en la provincia de Mendoza, donde se plantó casi el 38% del total, seguida por la provincia de Tucumán con el 10,3% y San Juan con el 10,1%.

En función de ello, se realizó una previsión de escenarios técnicos:

- Escenario BAU: Actividad habitual sin aplicación de biocarbón
- Escenario 1: Un escenario de mejora del contenido de carbono en el suelo, con poca aplicación de biocarbón. Aplicación de biocarbón hasta el 25% de la superficie plantada de frutales con pellets de una mezcla de biocarbón del 10%. Se prevé que la superficie plantada de frutales crezca un 1,5% anual durante el periodo 2020-2050
- Escenario 2: Un escenario de mejora del contenido de carbono del suelo, con la aplicación de un alto nivel de biocarbón. Aplicación de biocarbón hasta en un 60% de la superficie plantada de frutales con pellets de mezcla de biocarbón al 50%. Se prevé que la superficie plantada de frutales crezca un 2,0% anual durante el periodo 2020-2050.

Considerando los supuestos sobre el porcentaje de la superficie plantada de frutales con aplicación de biocarbón de hasta el 25% y hasta el 60% en el Escenario bajo y el Escenario medio respectivamente, la **iError! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra las estimaciones de superficie de aplicación de biocarbón para el periodo 2020-2050. Se asumió una dosis de 5 toneladas por hectárea por año de fertilizantes orgánico-minerales en forma de pellets. En el Escenario bajo esos pellets presentan una mezcla de biocarbón del 10% mientras que en el Escenario medio la mezcla aumenta al 50% de biocarbón. El cambio en la pendiente de la superficie con aplicación de biocarbón, refleja tanto los supuestos de superficie plantada de frutales a lo largo del tiempo como la curva de adopción del biocarbón dentro de esa superficie a lo largo del tiempo.

Figura 19: Área con aplicación de Biochar (hectáreas) y Aplicación de Biochar (ton/año)



Fuente: Elaboración propia

La inversión estimada para producir biocarbón con fines agrícolas varía en función del tipo y la calidad del biocarbón que se vaya a producir. Por ejemplo, el biocarbón "puro", o en combinación con el compostaje de residuos orgánicos, también conocido como abono "orgánico-mineral" (con una determinada mezcla de biocarbón).

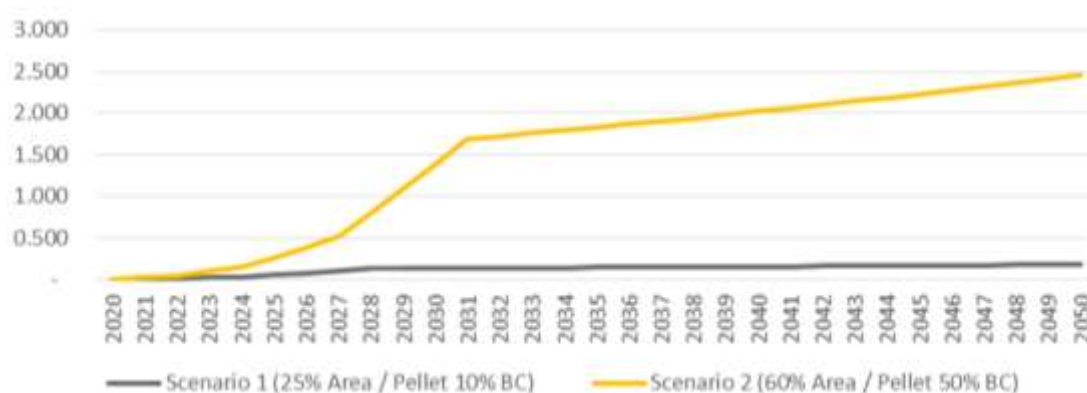
La producción de biocarbón se realiza a partir de la biomasa por pirolisis, que es un proceso exotérmico. La energía liberada puede ser parcialmente utilizada (aproximadamente el 30% de

la energía total) en la planta de procesamiento o en instalaciones cercanas. Esta característica de producción lo hace atractivo para ser instalado en polígonos industriales donde el uso de la energía puede ser más demandado. La producción de una tonelada de Biochar, a partir de 4 toneladas de biomasa base seca, permite generar unos 5 MW de energía.

En ambos escenarios en los que se añade el biocarbón, la biomasa necesaria para producir biocarbón y los residuos necesarios para producir compost, están ambos dentro de los límites de disponibilidad en Argentina según la estimación del informe WISDOM (FAO-INTA, 2009).

La metodología aplicada para Argentina da como resultado 2,5 MtCO₂e/año secuestradas en el Escenario medio para 2050. Mientras tanto, el Escenario bajo, con una menor área de aplicación de biocarbón y una menor mezcla de biocarbón en pellets, resulta en un secuestro de carbono mucho menor, de 0,2 MtCO₂e/año para 2050.⁵⁵

Figura 20: Escenarios de secuestro de carbono – Biochar – MtCO₂e/año



Fuente: Elaboración propia

La instalación de una planta de producción de biochar de 1.000 toneladas/año requiere una inversión aproximada de 600.000 USD. Si el objetivo es producir un pellet orgánico-mineral a partir del biocarbón y el compost, se requiere una inversión adicional de 400.000 USD para los procesos de compostaje y peletización, por lo que el total es de 1.000.000 USD por instalación de 1.000 toneladas/año. Se ha supuesto una curva de eficiencia en la inversión a lo largo del tiempo para los escenarios bajo y medio debido a las sinergias del aumento de la actividad, la madurez de la tecnología y el desarrollo de la cadena de valor. Por lo tanto, los escenarios bajo

⁵⁵ Para más detalle ver Carlino, H, Carlino, M y otros:2020. Current understanding of the impact of Carbon Dioxide Removal (CDR) approaches on the SDGs in LAC

y medio sumarían aproximadamente 100 y 900 millones de dólares de inversión respectivamente para el periodo 2020-2050.

1.1.3. *Inhibidores de la volatilización de urea*

En base a la proyección de rendimientos y uso de fertilizantes al 2050 se estimó el potencial de mitigación por uso de inhibidores de la volatilización de la urea.

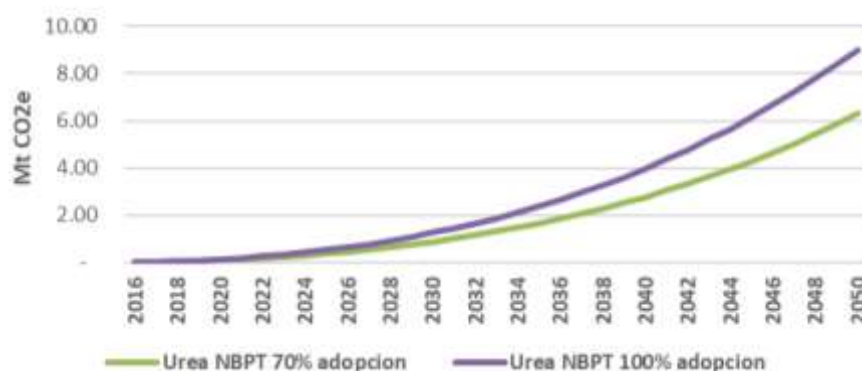
El potencial de mitigación del uso de inhibidores de la volatilización se estimó considerando literatura nacional y del extranjero. De acuerdo a estimaciones de Ferraris et.al, 2009 y Barbieri, et al., 2010, mediante el uso de inhibidores, la fracción por volatilización de N-NH₃ se reduciría de valores medios del 10% a valores del 0,5-1,3% en aplicaciones de Urea o UAN (UNEP-Risoe, 2013; Vazquez Amabile et al., 2014).

Una revisión de factores de emisión para fertilizantes sintéticos realizada por Cowan et al. (2020) fue aceptada recientemente por la EFDB editorial Board del IPCC. Los autores concluyen que el uso de inhibidores reduce significativamente las emisiones provenientes de la urea y UAN. Los autores consideran reducciones del 65% en las emisiones comparando Urea-NBPT con urea común.

Para estimar el potencial de mitigación se tomó una reducción promedio en la fracción de volatilización (Frac Gasf) del 75%. Esto implicaría una reducción de la Frac Gasf de 0.1 (default IPCC 2006) a valores de 0.025, equivalente a un potencial de mitigación del 7% en emisiones provenientes del uso de Urea. La urea representaba al 2016 un 70% del total de fertilizantes sintéticos nitrogenados. Por lo tanto, el potencial de mitigación para el total de la categoría fertilizantes sintéticos nitrogenados sería de 4.9%, alrededor del 0.25% del total del sector AFOLU al 2016. En valores absolutos al 2016, equivale a 0.34 MtCO_{2e} para dicho año.

La Figura 21 presenta la reducción acumulada de emisiones proyectada al año 2050, **considerando el uso creciente de fertilizantes sintéticos nitrogenados y niveles crecientes de adopción de urea-NBPT que lleguen al 70% y al 100% al año 2050**. La reducción acumulada del periodo 2016-2050 suma 6.3 y 9 MtCO_{2e} respectivamente.

Figura 21: Reducción acumulada de emisiones por uso de fertilizantes nitrogenados, para dos escenarios de adopción creciente de Urea con inhibidores de la volatilización (Urea-NBPT)



Fuente: Elaboración propia

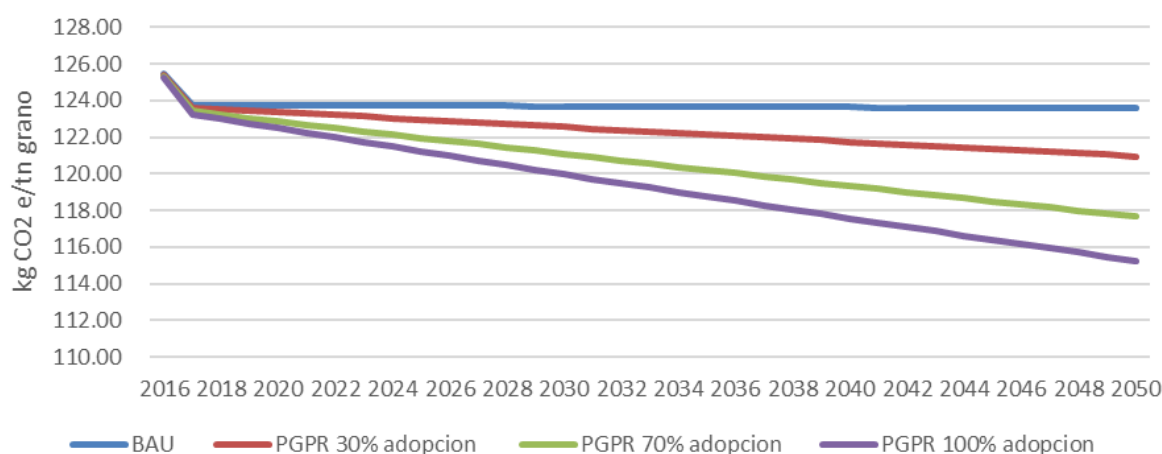
1.1.4. Uso de tecnologías PGPR

Para estimar el potencial de mitigación por uso de tecnologías PGPR, se asumió un incremento del 7% del rendimiento en cereales y en soja, ya que son los cultivos que ofrecen productos de estas tecnologías. Una evaluación en detalle fue realizada en el estudio de necesidades tecnológicas (UNEP-Risoe, 2013).

Para la proyección al 2050 se estimaron **3 escenarios de adopción gradual al 30%, 70% y 100%** (escenarios bajo, medio y alto) al final del periodo comenzando en 2016 hasta el 2050. La Figura 22 presenta la reducción gradual de emisiones en kg de CO₂e/ton grano, correspondientes a las emisiones por residuos de cosecha y fertilizantes nitrogenados. Se consideró que un 80% de las emisiones totales de fertilizantes nitrogenados corresponden a los cereales y soja, esta última como fosfatos de amonio.

Esta tecnología si fuera adoptada al 100% generaría una reducción del 7% de las emisiones por tonelada de grano, lo cual equivaldría a una reducción equivalente en la huella de carbono.

Figura 22: Reducción en la intensidad de emisiones por tonelada de grano (kg CO₂ e/tn grano) para cereales y soja con niveles crecientes de adopción de tecnologías PGPR al 2050



Fuente: Elaboración propia

2 Sistemas ganaderos

Argentina es un país en desarrollo y las expectativas de crecimiento de la ganadería son muy buenas en el mediano plazo (2030), como en el largo plazo al 2050. Siendo que las emisiones son directamente proporcionales al stock ganadero, y suponiendo que este crecerá, las emisiones lo harán también.

En la actividad de ganadería bovina de carne se cuantifican las emisiones en valores absolutos (Gg CO_{2eq}) aplicando la metodología de reporte del IPCC 2006.

Los países con ganaderías en desarrollo impulsan la validación ante los organismos internacionales del indicador de intensidad de emisión (t CO_{2eq} /kg Rch). Este indicador relaciona la emisión absoluta de GEI debido a la actividad (Gg CO_{2eq}) por unidad producida de carne (t eq Rch). Da cuenta de la eficiencia del proceso productivo en relación con la cantidad de emisiones totales producidas por la producción bovina de carne para obtener la unidad de producto. A continuación, se expresa la forma de obtenerlo:

$$\text{Intensidad de Emisión}_i = \frac{\text{Emisiones}_i (\text{t CO}_2)_{eq}}{\text{Producción}_i (\text{t eq Rch})}$$

Dónde:

Emisiones_i: total de emisiones generadas por el stock de bovinos de carne para el año *i* expresado en t CO_{2eq}

Producción_i: producción de carne para el año *i*, año para el cual se calcula el indicador

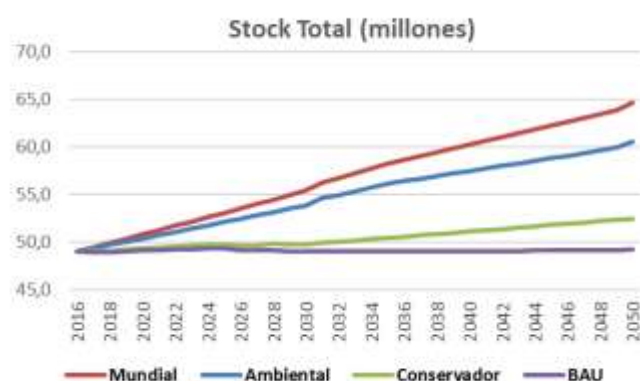
Para el sistema de información que se cuenta en Argentina de las estadísticas ganaderas y de los informes previos de INVGEI se puede avanzar con proyecciones ganaderas y medidas de mitigación regionalizadas. Para enriquecer el análisis se incluyen junto a las proyecciones, escenarios alternativos. A continuación, se describen el contexto que da origen y sus respectivos indicadores:

1. **Escenario de línea de base** (*business as usual* o BAU), en el cual la producción ganadera sigue las tendencias históricas (año 2016);
2. **Escenario Conservador:** escenario típico en Argentina, que sólo incrementa levemente el stock de vientres (8%) como variable financiera de resguardo. No se producirían cambios en eficiencias.
3. **Escenario Ambiental:** representa el escenario deseado para proponer en los lineamientos para cumplir las ambiciones ambientales nacionales. Se genera la eficiencia en la producción mejorando la relación ternero - vaca hasta un 73% (10% más que el año base 2016). Asimismo, se aumenta la producción de carne por el aumento del peso medio de faena hasta 235 kg eqRcH (10% más que el año base).
4. **Escenario Mundial:** escenario que permitiría a la Argentina mismas condiciones que los países desarrollados. Los indicadores de eficiencia alcanzan un 80% en la relación ternero - vaca (15% más que el año base) y del peso medio de faena hasta 245 kg eqRcH (15% más que el año base). La posibilidad de ocurrencia de este escenario es muy ambiciosa, los objetivos productivos son altamente exigentes y serían necesarios no solo cambios políticos estructurales sino también acompañados por cambios en los sistemas de producción.

De las encuestas a referentes, productores y asesores técnicos, se confirmaron los tres escenarios más el BAU: Conservador, Ambiental y Mundial. En la Figura 23 a continuación se muestran los indicadores ganaderos.

Figura 23: Indicadores ganaderos. Stock total (a), stock de vientres (b) y stock de invernada (c)

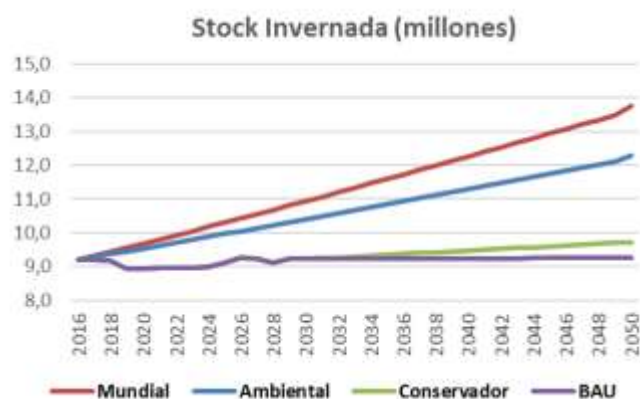
a) Stock total



b) Stock de vientres



c) Stock de invernada



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a los diálogos mantenidos con los actores clave, se validaron los valores de referencia para determinar la eficiencia de producción, que se muestra en la Figura 24 a continuación.

Figura 24: Relaciones ternero/vaca (a) y producción total (b)

a) Relación ternero/vaca (%)



b) Producción (mt eqRch)



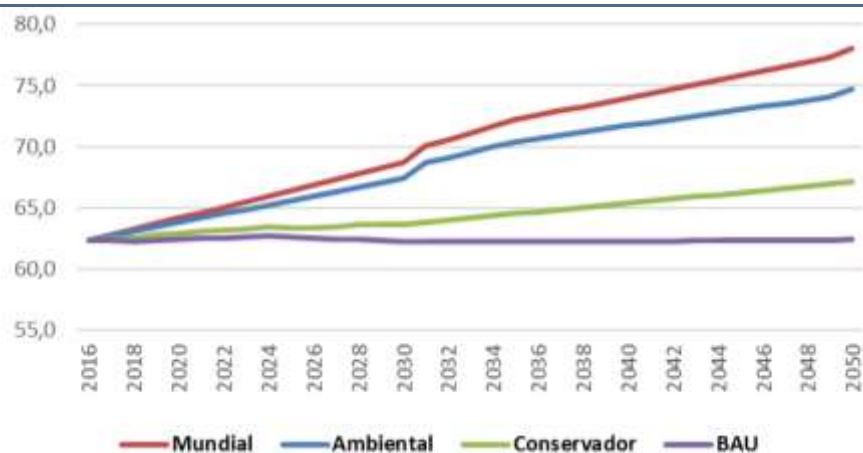
Fuente: Elaboración propia

2.1. Reducción de "Intensidad de Emisiones" se reduce mediante el aumento de tasa de extracción (TE) del rodeo nacional (Peso medio de faena y tasa destete)

En lo que se refiere a las emisiones (Figura 25), en el año de base (2016) se producen por la ganadería 62,3 Mt CO_{2eq}. En el escenario Conservador se estarán incrementando las emisiones

totales hasta 67,1 Mt CO_{2eq} (+7%), un 19,7% en el Ambiental (74,7 Mt CO_{2eq}) y hasta un 25% más (78,1 Mt CO_{2eq}) en el Mundial.

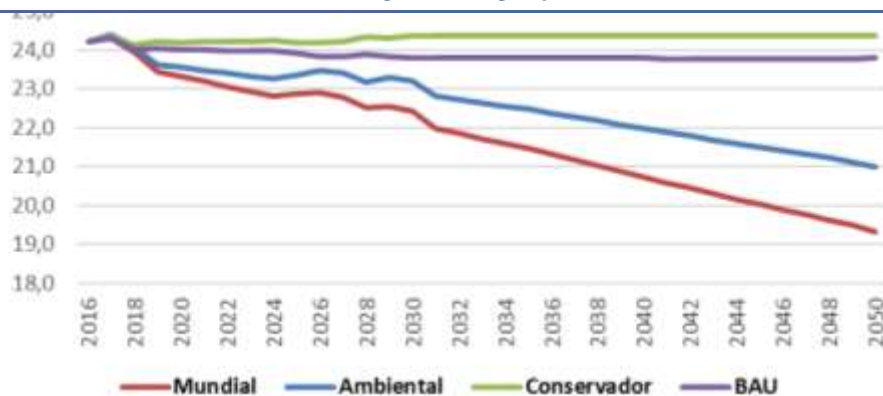
Figura 25: Total de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero según escenarios – Mt CO_{2e}



Fuente: Elaboración propia

Asimismo, las proyecciones de aumento en la cantidad de producto obtenido (Figura 26) son de 7% en el Conservador, 38% en el Ambiental y un 57% en el Mundial con respecto al año base. Esto impacta positivamente en el indicador de eficiencia productiva, expresado en la intensidad de emisión de la ganadería. Para el año base la intensidad de emisión es de 24,2 kg CO_{2eq}/kg Rch, para el escenario Conservador casi no habría cambios (+0,6%) con 24,3 kg CO_{2eq}/kg Rch, una reducción del 13,1% (21 kg CO_{2eq}/kg Rch) para el Ambiental y la máxima reducción en el escenario Mundial de 20,1% (19,3 kg CO_{2eq}/kg Rch).

Figura 26: Intensidad de emisiones de GEI – kg CO_{2e}/kg eq Rch

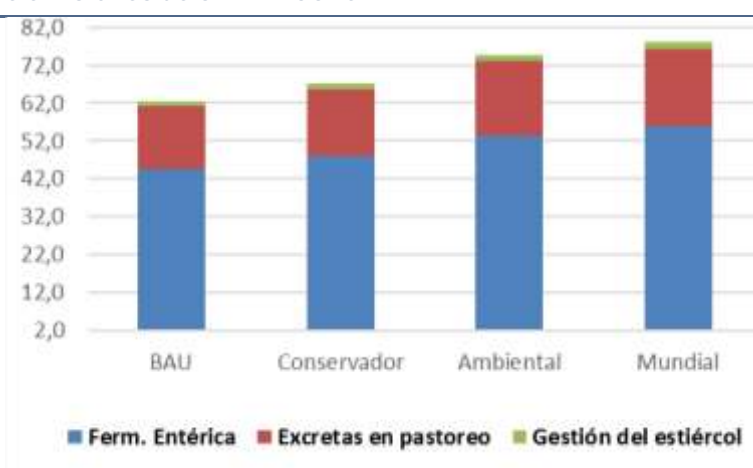


Fuente: Elaboración propia

2.2. Otras Ganaderías y sistemas Bovinos intensivos: Estimación del impacto relativo de la implementación de Biodigestores (u otras técnicas) en la Gestión del Estiércol en sistemas ganaderos intensivos

En los sistemas bovinos la gestión del estiércol representa cerca del 1% del total de AFOLU y el 2% del total de contribución de la ganadería bovina de carne (Figura 27).

Figura 27: Perfil de emisiones de GEI - MtCO₂e



Fuente: Elaboración propia

En lo que respecta a los sistemas bovinos de leche, la gestión de excretas representa el 0,44% de las emisiones del sector AFOLU. Cuando consideramos otras ganaderías el mayor aporte está en las producciones de cerdos (0,8% de AFOLU). En total los sistemas productivos que tienen gestión de excretas y con potencial de acción sobre ellas aportan 2,99 Mt CO₂eq (2,2 % de AFOLU).

Las barreras de implementación llevan una baja adopción de biodigestores como alternativa de generación eléctrica y mitigación. Argentina cuenta con una ley para la generación de energía distribuida, sin embargo, solo algunas provincias han adherido. También las altas inversiones son barreras de inserción, pero no solo por el capital del sistema biodigestor, sino incluyendo al sistema productivo que no cuenta con las instalaciones necesarias para la gestión del estiércol con la calidad necesaria para su digestión anaeróbica incrementando los montos.

Por otra parte, el aprovechamiento del metano (CH₄) para producción de energía mitiga en una proporción los GEI (2,99 Mt CO₂e). El sistema de transformación tiene como subproducto al biol que se deberá aportar como enmienda (reemplazo de fertilizantes sintéticos) a los suelos de cultivos agrícolas.

En Argentina, con una deuda pendiente en la sostenibilidad de los suelos y en el aporte de nutrientes (reciclado) por llevar históricamente producciones con extracción, pareciera de mayor factibilidad de implementación, por la seguridad y los requerimientos de inversión, el uso agronómico de las excretas y purines. Son prácticas que no requieren de grandes inversiones y al productor le resultan culturalmente más fáciles de gestionar y la gestión siempre es tranqueras adentro, no depende de ningún mercado de precios.

3 *Bosques cultivados*

En esta categoría se incluyen tres elementos que están relacionados a la captura de carbono por incremento anual de la biomasa forestal:

- La más significativa corresponde al aumento anual del área forestada.
- En segundo lugar, aunque en menor proporción, el incremento de las tasas anuales de crecimiento por mejora genética de las especies implantadas.
- Por último, la captura de carbono en productos de madera recolectada (PMR). Esto último es relevante con relación a los incentivos al tipo de demanda por parte de la industria (celulosa, mueblería, construcción y otros productos de madera). La categoría PMR no ha sido incluida en los inventarios GEI ni en las proyecciones para el sector forestal, sobrestimando las emisiones por extracciones y cortes del sector forestal.

3.1 *Aumento de la superficie forestada*

Para la elaboración de los escenarios de aumento anual del área forestada se identificaron variables clave específicas para Argentina y se recopilaron y analizaron sus estadísticas históricas:

- Superficie de bosques cultivados (hectáreas)
- Superficie de bosques nativos (hectáreas)
- Producción forestal de madera (toneladas)
- Valor bruto agregado en el sector de la silvicultura y la extracción de madera (precios constantes en moneda local)
- Valor bruto de la producción en el sector de la silvicultura y la extracción de madera (precios constantes en moneda local)
- Puestos de trabajo registrados en el sector de la silvicultura y la extracción de madera (número de puestos de trabajo), cuando estén disponibles
- Empresas activas en el sector de la silvicultura y la extracción de madera (número de empresas), si están disponibles

En Argentina hay 53 millones de hectáreas de bosque nativo, aproximadamente el 6% de la superficie forestal de Sudamérica. El bosque nativo se concentra en el sector centro-norte del país, abarcando las provincias de Formosa, Chaco, Tucumán, Santiago del Estero, Córdoba, Santa Fe, Misiones, Corrientes, La Pampa, Río Negro, Neuquén, Mendoza, San Juan, San Luis y Catamarca.

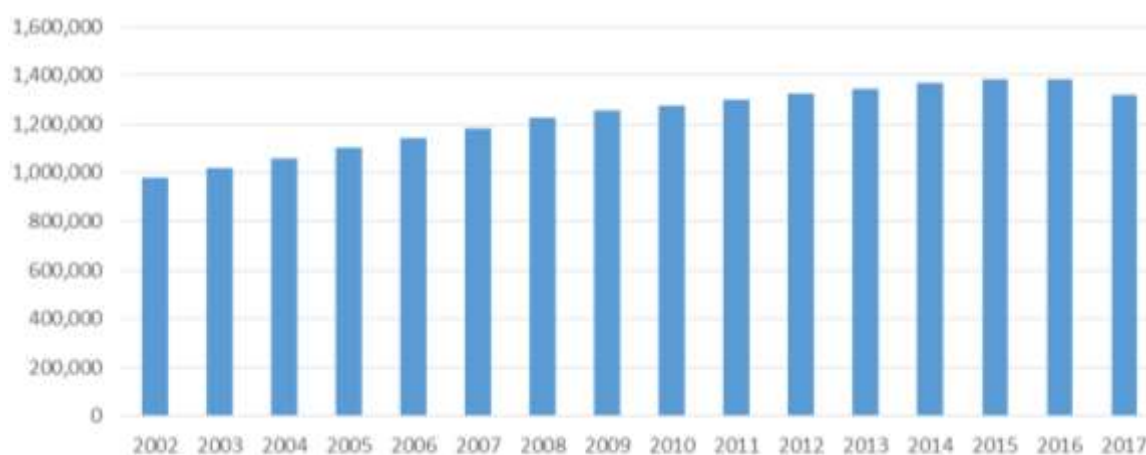
Figura 28: Principales regiones de Bosques Nativos en Argentina



Fuente: Regiones forestales de Argentina. Archivo de la Secretaría de Medio Ambiente de la Nación

Según los últimos datos oficiales consolidados por la Dirección de Producción Forestal, la superficie forestal cultivada en el año 2017 fue de 1.317.793 hectáreas, lo que supone un crecimiento CAGR del 1,7% en el periodo 2002-2017.

Figura 29: Superficie de bosques cultivados en Argentina – hectáreas



Fuente: SSPMicro basado en Dirección de Producción Forestal 2017; Biennial Update Report (BUR) 2016

La región de la Mesopotamia (provincias de Misiones, Corrientes y Entre Ríos) es la mayor zona de plantaciones forestales de Argentina. Tanto en Misiones como en Corrientes, la especie predominante es el pino, mientras que en Entre Ríos la especie predominante es el eucalipto. Las salicáceas (sauces y álamos) se encuentran principalmente en el norte de Buenos Aires y el sur de Entre Ríos.

Figura 30: Caracterización de la superficie de bosques cultivados en Argentina

a) Plantaciones en las regiones de Mesopotamia y Delta. Año 2017



b) Superficie de bosque cultivado por región y especie. Año 2017

Provincia / Región	Coníferas	Eucaliptos	Salicáceas	Otras	Total	Participación
Corrientes	345.565	121.857		9.181 (**)	471.583	36%
Misiones	348.305 (**)	40.902		16.617 (***)	405.824	31%
Entre Ríos	14.156	112.785	23.279	577	150.797	11%
Buenos Aires	4.027	7.018	65.091	70 (***)	77.014	6%
Patagonia	109.031		1.744 (a)		110.775	8%
Noroeste	5.404	15.875	114	3.654	25.047	2%
Centro	34.172	14.632	1.602	2.520	52.926	4%
Cuyo			8.015 (b)		8.015	1%
Resto	796			13.122 (c)	13.918	1%
Total País	861.198	313.869	99.845	42.729	1.317.793	100%

Fuente: SSPMicro 2019. Reporte de Cadena de Valor de Forestación, Papel y Muebles. ISSN 2525-0221

Varias entidades han realizado diferentes estimaciones sobre el potencial de las plantaciones forestales en Argentina, entre ellas

- 5 millones de hectáreas (SENASA)
- 18 y 20 millones de hectáreas de tierras con aptitud forestal, de las cuales 5 millones no compiten en uso con otras actividades agrícolas alternativas (FAO, 2001)
- 15 millones de hectáreas de áreas con potencial endoenergético (FAO, 2020)

Además, el plan nacional ForestAr 2030 establece el objetivo de aumentar la superficie forestal cultivada en Argentina de los 1,3 millones de hectáreas actuales a 2,0 millones de hectáreas para el año 2030. La piedra angular de ForestAr 2030 es la comprensión de que los bosques ofrecen la mayor "solución climática natural" a través de la conservación, la restauración y la mejora de las técnicas de gestión de la tierra que aumentan el almacenamiento de carbono o evitan las emisiones de gases de efecto invernadero en los paisajes de todo el mundo.

En este contexto, la proyección al 2050 se planteó para escenarios de incremento anual del área forestada.

1. **Escenario de línea de base** (*business as usual* o BAU), donde el incremento de la superficie es de 10.000 ha/año;
2. **Escenario intermedio:** escenario donde el incremento de la superficie forestada es de 40.000 ha/año;
3. **Escenario de máxima:** escenario donde el incremento de la superficie forestada es de 60.000 ha/año;
4. **Escenario carbono neutralidad:** escenario donde el incremento de la superficie forestada permite que el sector sea carbono netral (270.000 ha/año). Se incluye una sección específica de análisis de este escenario.

Descripción y resultados de los Escenarios base, medio y alto

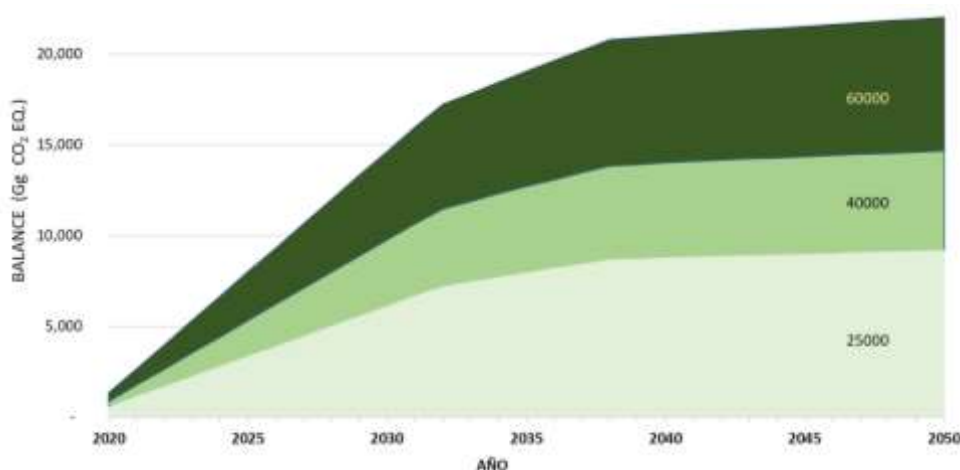
La Figura 31 corresponde a la fijación neta de CO₂ para los escenarios planteados de incremento de superficie de plantaciones forestales. En el gráfico se observa una curva inicial con pendiente mayor que el resto de la curva, esto es debido a que la superficie implantada comienza a fijar CO₂, siendo las emisiones constantes debido que solo emiten aquellas plantaciones de la superficie implantada inicial que llegan a turno. Se identifica un primer punto de inflexión, a partir del cual, si bien las plantaciones siguen aumentando en superficie, comienza a haber emisiones por turno de la superficie implantada en los primeros años de la serie 2018-2050. En el segundo punto de inflexión sucede lo mismo con plantaciones de turno más largo.

En esta estimación del balance de CO₂ no se incluyen las emisiones por tratamientos intermedios de las plantaciones (podas y raleos), tampoco se consideran emisiones/absorciones de productos con origen en las forestaciones.

De acuerdo a esta estimación, la captura neta acumulada de carbono para el periodo 2020-2050 sería de 82.3, 328.6 y 492.9 MtCO₂ para los 3 escenarios planteados respectivamente. La captura "promedio anual" para todo el periodo, asciende a 2.65, 10.6 y 15.9 MtCO₂/año.

De acuerdo con el informe nacional de inventario 2016 (BUR 3), la captura neta de carbono de la categoría bosques cultivados, en el año 2016 fue de 23.4 MtCO₂/año, equivalente a un 17% del total de emisiones del sector AFOLU. Es decir que esta medida representaría un potencial de mitigación equivalente a un incremento promedio, en las capturas de carbono, del 11%, 45% y 69%, para los tres escenarios planteados para la categoría bosques cultivados para el periodo 2020-2050.

Figura 31: Captura neta de CO₂ de la categoría Bosques implantados en los 3 escenarios



Fuente: Elaboración propia

Descripción y resultados del Escenario carbono neutralidad

Considerando el compromiso de C neutralidad al año 2050 tomado por la Argentina, se analizó un escenario de "emisión cero" para el sector AFOLU, considerando el efecto del incremento del área forestada, por ser la medida de mitigación más significativa para el sector. Las medidas de mitigación analizadas no fueron incluidas en este análisis, pero pueden incorporarse en un análisis posterior y no deben ser ignoradas en una estrategia de largo plazo.

El objetivo del presente análisis es una realizar una primera cuantificación del área necesaria de bosques implantados en Argentina para compensar las emisiones provenientes de suelos

agrícolas (residuos y fertilizantes), ganadería (fermentación entérica y excretas) y cambio de uso del suelo (deforestación y cambio del stock de carbono en el suelo).

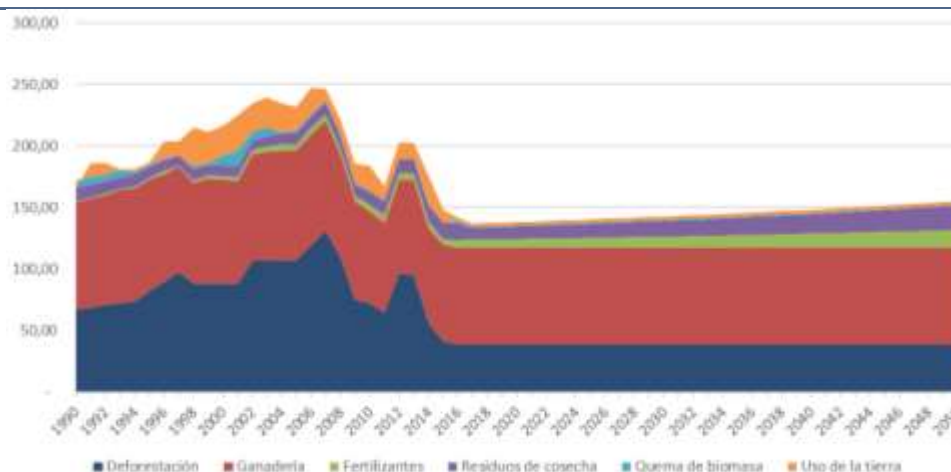
Esta estimación fue realizada en base a la implantación de pinos, eucaliptus y salicáceas, por ser especies que cuentan con mayores tasas de crecimiento, genética y un potencial de industrialización más cercano. Una segunda estimación podría también haberse realizado considerando la forestación con especies nativas, las cuales presentan tasas de crecimiento inferiores, demandando por lo tanto un área mayor de implantación. Como complemento puede también analizarse la recuperación de áreas de bosque nativo degradadas mediante el enriquecimiento con especies nativas, lo cual es un proceso más complejo de sucesión ecológica de la flora.

Se estimaron las emisiones del sector AFOLU para el periodo 2020 al 2050 a partir del 2016 para todas las categorías. La proyección 2017-2050 de la línea de base en cultivos agrícolas y ganadería siguió el criterio utilizado en el análisis de medidas de mitigación. La tasa de deforestación se consideró uniforme del 2016 en adelante (155.000 ha/año) como así también el cambio en el stock de carbono en el suelo.

Esta proyección totaliza un valor total de emisiones de 155 MtnCO₂e al 2050. Sobre dicha proyección valor se estimó la superficie forestal implantada en crecimiento que sería necesaria para compensar las emisiones del sector, a alcanzar un escenario de carbono neutralidad al 2050. (Figura 32).

El incremento necesario del área forestal se estimó en base a una tasa de crecimiento anual de bosques implantados surgida del promedio ponderado de las tasas de crecimiento y factores de conversión y expansión (BCEFi) de coníferas, eucaliptus y salicáceas según el inventario actual de GEI de la Argentina (Tabla 32 y Tabla 33).

Figura 32: Emisiones sector AFOLU – sin bosques implantados (serie histórica al 2016)



Fuente: elaboración propia en base al BUR 3 de la República Argentina

Tabla 32 Tasas de crecimiento por especie y provincia

Incremento anual neto promedio para un tipo de vegetación específica (iv) (m ³ /ha/año)					
Provincia	Coníferas	Eucalipto	Salicácea:	Otras	Promedio
Buenos Aires	20,00	30,73	21,50	20,00	23,06
Catamarca	20,00	40,00	23,00	20,00	25,75
Chaco	20,00	20,00	23,00	5,00	17,00
Chubut	19,50	40,00	23,00	18,00	25,12
Córdoba	20,28	25,00	24,97	14,50	21,19
Corrientes	22,08	35,00	23,00	14,80	23,72
Entre Ríos	23,84	32,00	20,59	14,50	22,73
Formosa	20,00	20,00	23,00	14,50	19,38
Jujuy	30,00	28,63	23,00	15,53	24,29
La Pampa	20,00	22,00	23,00	18,00	20,75
La Rioja	20,00	40,00	23,00	18,00	25,25
Mendoza	20,00	40,00	23,00	18,00	25,25
Misiones	30,00	35,00	21,47	16,55	25,76
Neuquén	19,53	40,00	23,00	16,50	24,76
Río Negro	19,50	40,00	23,00	18,00	25,13
Salta	22,83	27,50	23,00	15,53	22,21
San Juan		22,00	23,00	18,00	21,00
San Luis	20,00	40,00	23,00	15,00	24,50
Santa Cruz	19,50		21,50		20,50
Santa Fe	25,00	21,25	21,50	14,50	20,56
Santiago del Estero		40,00	23,00	18,00	27,00
Tucumán	25,00	30,00	23,00	15,85	23,46
Grand Total	21,85	31,86	22,71	16,13	23,15

Fuente: BUR 3

Se asumió un crecimiento del forestada regional manteniendo las proporciones actuales de las distintas cuencas forestales sobre el total nacional. Este supuesto asume que la expansión del área forestal comenzaría en forma radial en torno a los centros de consumo y procesamiento para ir gradualmente creciendo a zonas más alejadas o nuevos centros de procesamiento.

Tabla 33 Factores de conversión y expansión por especie y provincia - Fuente BUR3

Factor de conversión y expansión de biomasa BCEFi en crecimiento (ton biomasa/m3 de madera)					
Provincia	Coníferas	Eucalipto	Salicácea:	Otras	Promedio
Buenos Aires	0,67	0,60	0,60	0,48	0,59
Catamarca	0,69	0,48	0,60	0,48	0,56
Chaco	0,54	0,66	0,66	0,66	0,63
Chubut	0,60	0,48	0,60	0,48	0,54
Córdoba	0,67	0,60	0,60	0,60	0,62
Corrientes	0,54	0,66	0,66	0,66	0,63
Entre Ríos	0,69	0,60	0,60	0,60	0,62
Formosa	0,54	0,66	0,66	0,66	0,63
Jujuy	0,69	0,60	0,60	0,60	0,62
La Pampa	0,67	0,60	0,48	0,48	0,56
La Rioja	0,69	0,48	0,60	0,48	0,56
Mendoza	0,69	0,48	0,60	0,48	0,56
Misiones	0,54	0,66	0,66	0,66	0,63
Neuquén	0,60	0,48	0,60	0,48	0,54
Río Negro	0,60	0,48	0,60	0,48	0,54
Salta	0,54	0,66	0,66	0,66	0,63
San Juan		0,60	0,60	0,48	0,56
San Luis	0,67	0,48	0,60	0,60	0,59
Santa Cruz	0,69		0,60		0,65
Santa Fe	0,69	0,60	0,60	0,60	0,62
Santiago del Estero		0,48	0,60	0,48	0,52
Tucumán	0,69	0,60	0,60	0,60	0,62
Grand Total	0,64	0,57	0,61	0,56	0,59

Fuente: BUR 3

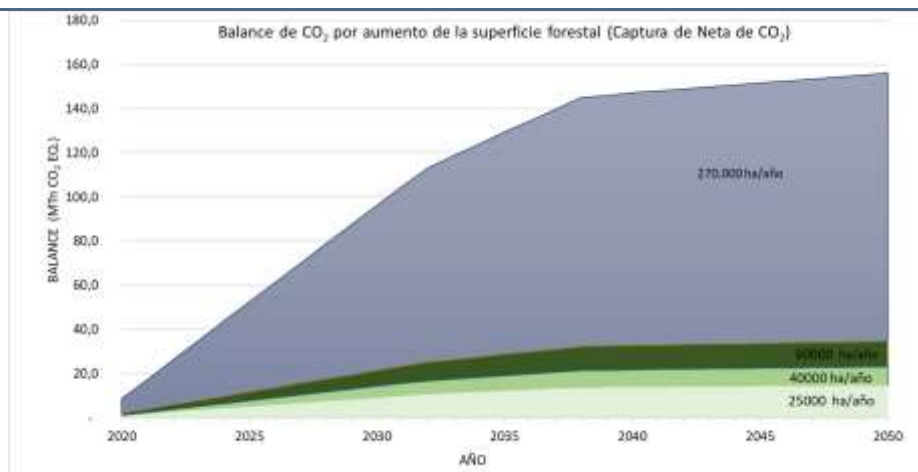
La fijación de CO₂ por crecimiento forestal es muy eficiente, pero debe considerarse su aprovechamiento y turnos de corta que varían la especie, la región y el destino de uso.

Considerando las tasas de crecimiento de las especies mencionadas, un total de 4.4 millones hectáreas forestadas lograrían capturar 155 Mtn de CO₂ por año, las cuales podrían ser implantadas al 2050 a un promedio de 146.600 ha/año. Sin embargo, debe considerarse que durante este lapso una parte del bosque implantado se corta y esto genera una emisión del C acumulado durante el periodo de crecimiento. Es decir que durante el periodo 2020-2050 al área de incremento le tocarían aproximadamente 2.5 turnos de corte, emitiendo una parte del carbono capturado durante los años anteriores. El gráfico de la Figura 33 muestra los puntos de inflexión y cambios de pendiente por efecto del aprovechamiento por cortes a lo largo del periodo 2020-2050. Esto implicaría una necesidad mayor del área forestal implantada para alcanzar la carbono neutralidad al 2050, duplicándose a más de 8 millones de hectáreas de incremento, que se sumarían a las 1.3 millones de hectáreas actuales.

Un aspecto para analizar es el impacto de la prolongación del carbono secuestrado luego del corte, en "productos de madera recolectada" que no generan una emisión ya que permanecen un tiempo en construcciones, muebles, papel etc. El BUR 4 incluiría por primera vez esta categoría dentro del inventario de la GEI de la República Argentina. Esto podría reducir el área a

forestar en una proporción que dependerá del tipo de industrialización predominante y la vida media de los productos de madera producidos.

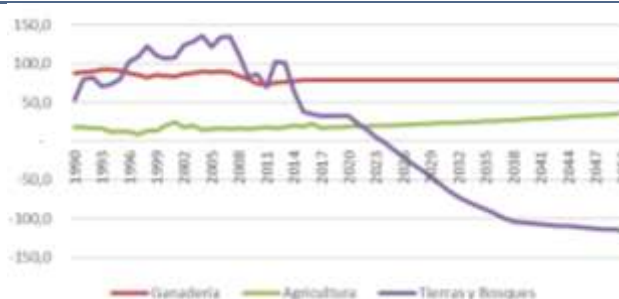
Figura 33: Evolución de la captura neta anual de CO₂ según tasas de incremento del área forestada



Fuente: Elaboración propia

La Figura muestra la tendencia de las emisiones provenientes de cultivos agrícolas y ganadería y las emisiones por cambios de uso del suelo y capturas por incremento del área de bosques implantados al 2050. La Figura 34 representa la emisión neta compilada del sector AFOLU considerando los distintos subsectores, con sus emisiones y capturas

Figura 34: Emisiones netas de la agricultura, la ganadería y el bosques cultivados y uso de la tierra



Fuente: Elaboración propia

Figura 35: Emisión neta del sector AFOLU al 2050 por escenario de carbono neutralidad



Fuente: Elaboración propia

De cara al **2050**, el escenario más ambicioso en términos de reducción de emisiones totales, y apuntando a la **carbono-neutralidad**, consistiría en la **necesidad de implementar lo siguiente**:

- Aumentar en 8 millones de hectáreas el área forestada.
- Adopción al 100% de la urea "no volátil".
- Aplicación de Biochar (pellets al 50%) en el 60% de la superficie frutícola.
- Desarrollo y consolidación de prácticas de manejo y conservación, adaptadas a cada región, en ganadería y agricultura, que permitan pasar de una reducción en las emisiones a un incremento en los niveles de secuestro de carbono. En agricultura buscando la máxima producción de biomasa y la mayor ocupación con gramíneas en los ciclos agrícolas (rotaciones). En ganadería, mediante sistemas de pastoreo y mejoramiento forrajero. Esto último está estrechamente relacionado con la mejora en los índices reproductivos y la reducción de intensidad de emisiones.

3.2. Incremento de la tasa de crecimiento en especies forestales implantadas (Incorporación de genética)

La incorporación de genética por medio del uso de clones permitiría también incrementar la captura de carbono. Al incremento en la superficie forestada se le adicionarían los incrementos futuros en la tasa de crecimiento por mejora genética.

En las últimas décadas, los programas de mejoramiento genético forestal en la Argentina, y en el mundo, han pasado a convertirse en un componente esencial a la hora de lograr grandes avances

en el aumento de la adaptabilidad y la productividad de los bosques cultivados a través de la selección de los mejores genotipos. Los planes de mejora poseen objetivos múltiples, principalmente se busca mejorar la productividad, mejorar la forma de fustes, el aumento de resistencia a ciertas enfermedades y/o plagas, la resistencia a factores climáticos (sequías, heladas, inundaciones, etc.) entre otras.

En el presente trabajo se relevaron datos con el fin de estimar la generación de biomasa a futuro en los principales grupos de especies exóticas que se cultivan en Argentina.

Los datos utilizados se refieren a los determinados en pruebas de campo, la variabilidad ambiental (suelo, clima, etc.) en general distorsionan los valores de ensayo para aumentar o disminuir, en función de la calidad de sitio, las tasas de crecimiento referidas de los ensayos.

Por otro lado, debe entenderse que, el aumento de las tasas de crecimiento, no conllevan a un aumento de volumen al finalizar el ciclo de cultivo, sino que el ciclo se hace más corto (turnos de corte de menos años). Es decir que se logra el mismo producto en menos tiempo y, por lo tanto, en el largo plazo se produce más, capturando más carbono. Esto significa que la incorporación de genética en especies forestales tendría un efecto significativo en la captura de carbono, siendo una efectiva medida de mitigación.

Debido a que el comportamiento de nuevos genotipos puede no ser uniforme en diferentes regiones forestales, su estimación es compleja. Asimismo, el grado de adopción puede ser más lento que en agricultura extensiva, donde la incorporación de genética puede ser anual. En especies forestales los tiempos se ajustan a los turnos de corte, que es cuando se incorporan nuevas variedades o nuevos clones. Esto dificulta incorporar esta acción de mitigación en proyecciones al año 2050.

En la actualidad se encuentran en estado de desarrollo y evaluación diferentes programas de mejora que utilizan diversos procedimientos, que permiten obtener mejoras en distintas características que apuntan a satisfacer las demandas del mercado. A continuación, se expondrán los resultados encontrados en publicaciones y divulgaciones científicas de diferentes organismos estatales que, a través de sus valores, puedan ser empleados en la estimación de biomasa fijada por las principales plantaciones forestales exóticas en el futuro.

3.2.1. Coníferas

En concordancia con las necesidades de las diferentes regiones del país donde se cultivan coníferas, durante estos últimos años se priorizaron para el mejoramiento genético las siguientes especies: *Pinus taeda*, *P. elliottii*, *P. caribaea* var. *hondurensis*, el híbrido F1 *P. elliottii* var. *elliottii* x *P. caribaea* var. *hondurensis* (PEEXPCH), *P. patula*, *P. greggii* var. *greggii*, *P. ponderosa*.

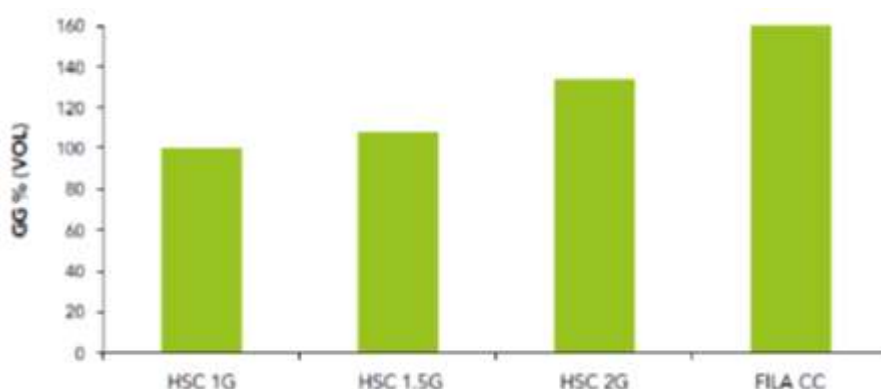
En la región mesopotámica, la estimación de los valores de mejora en los ensayos de primera generación de *P. taeda* permitió seleccionar los mejores individuos tanto para la conformación de la población de mejora de segunda generación como para la conformación de nuevos huertos.

La especie principal considerada fue *Pinus taeda*, por su reconocida adaptabilidad y productividad en sitios con buen drenaje (Lomas y tendidos altos). En sitios con severas restricciones de drenaje se plantó en su inicio *Pinus elliottii*. En los últimos años esta especie fue reemplazada por *Pinus caribaea* var. *hondurensis* de mayor productividad y mejor forma.

La base genética generada en la primera generación permitirá sostener ganancias en un programa de mejoramiento genético de largo plazo. Las heredabilidades son moderadas a altas para volumen por lo que es posible obtener ganancias genéticas considerables para esta variable.

Las ganancias genéticas en volumen de los huertos semilleros clonales de Marion varían entre 18 y 25%. Los resultados de la simulación de ganancias con un esquema de manejo intensivo, muestran que una familia del 40% de ganancia en volumen a los 7 años termina con una ganancia del 27% al final del turno. La Figura 36 muestra la ganancia genética de un plan de mejora en *P. taeda* en sus diferentes fases (SAGyP UCAR, 2015). Se encontraron datos de huertos semilleros clonales raleados (HSC1.5) con valores de entre 10 y 20 % mayores en volumen frente a los lotes comerciales de la región.

Figura 36: Ganancias en volumen de los diferentes huertos semilleros clonales (HSC 1G, HSC 1.5G y HSC 2G) y familias de Cruzamientos Controlados (Flia CC) de *P. taeda*



Fuente SAGyP UCAR (2015)

3.2.2. Eucaliptus

El cultivo de *E. grandis* ha logrado marcadas ganancias con la introducción de materiales importados de Sudáfrica o de Zimbabwe, en esas primeras ocasiones con el ingreso de semillas

provenientes de rodales o huertos semilleros de primera generación y, posteriormente, con la disponibilidad para importar semilla de excelentes huertos semilleros de segunda o tercera generación sudafricanos, las mejoras alcanzaron a superar en un 72% al testigo original. Cabe destacar que los rendimientos estimados para el mejor huerto semillero clonal de 1.5G/2.0G alcanza hasta el momento un rendimiento apenas inferior al mejor huerto importado.

Las líneas de interés por los híbridos, radica en combinar en nuevos genotipos la rapidez de crecimiento, buena forma y calidad maderable de *E. grandis* con la mayor adaptabilidad a ciertos ambientes pedoclimáticos (suelos secos, pobremente drenados, arcillosos y/o ambientes fríos) de especies tales como *E. camaldulensis*, *E. tereticornis* y *E. dunnii*, brindando al mismo tiempo una madera de mayor densidad apta para ciertas aplicaciones sólidas

Los primeros ensayos de clones híbridos evaluados han demostrado la existencia de genotipos con crecimientos similares a *E. grandis*, con mayor tolerancia al frío, densidad de madera superior y tensiones de crecimiento iguales o inferiores a esta especie. Seis de estos clones ya se encuentran inscriptos en el Registro Nacional de Cultivares (RNC) del INASE. En busca de nuevos genotipos con alta tolerancia al frío, recientemente se han iniciado, en conjunto con una empresa privada (POMERA MADERAS), cruzamientos de *E. grandis* x *E. benthamii*.

En síntesis, los programas de mejoramiento en Eucalipto han tenido éxito en décadas pasadas, siendo hoy la prioridad buscar individuos con las características de crecimiento y madera de *E. grandis* con adaptabilidad a ambientes donde este no prospera a través de la hibridación con otras especies del género y su posterior clonación. En otras palabras, se busca avanzar con el cultivo sobre ambientes donde *E. grandis* no prospera actualmente, a sistemas de producción mixtos (silvopastoriles) y a características de la madera.

3.2.3. Salicáceas

En Argentina, los trabajos se iniciaron a mediados del siglo XX y sumados a los esfuerzos de introducción y selección realizados en conjunto por el sector público y privado, generaron una serie de clones que se han utilizado por décadas (Ragonese, 1993; Borodowski y Suárez, 2004; Cortizo, 2005; Cerrillo, 2021). La mayor parte de los programas de mejora se basan fundamentalmente en la hibridación interespecífica, la cual permite maximizar la varianza genotípica a través de la combinación de las características sobresalientes de las distintas especies, seguida de un minucioso trabajo de selección que opera a través de las distintas fases del programa.

En las últimas décadas, a partir de los planes de mejora en álamo, los clones Guayracá y Ñacurutú INTA fueron paulatinamente incorporados a una red de ensayos comparativos del programa de mejoramiento instalada en quintas pertenecientes a campos de productores locales y en la E.E.A.

Delta del Paraná (2000 y 2002) en donde se evaluaron, además de las variables antes mencionadas, las características del fuste y la densidad básica de la madera.

Ambos clones presentan un crecimiento en volumen similar o significativamente superior a los testigos, excelente tolerancia a roya y a cancrrosis, y un fuste adecuado para usos sólidos.

El sauce (*Salix spp*) tiene, con más de un siglo y medio de historia, su principal núcleo productivo en el Delta por la excelente adaptación y capacidad de generar madera en turnos relativamente cortos. Es rústico para las zonas bajas, que representan el 80% del humedal, considerándose estratégico para proyectar un incremento significativo de producción en la cuenca. Actualmente, más de dos tercios de las plantaciones de Salicáceas son de sauce con destino principal "triturado" (pasta para papel -para diarios y para embalaje- y tableros de partículas).

La destacada calidad para pasta los convierte en equivalentes al clon 'Soveny Americano' (SA), el único con estándares superiores para esa industria, pero de pobre rendimiento, que ha llevado a los productores a no plantarlo desde hace años. Tras un programa de mejoramiento genético se han logrado obtener nuevos cultivares equivalentes al SA que permiten proyectar un aumento de los rendimientos a nivel regional en el mediano plazo, con mejora en la calidad de la madera.

Tabla 34: Crecimiento de los nuevos clones y turnos de corta por calidad de sitio

Incremento medio anual (m ³ /ha/año)				
Clon	Calidad de sitio			Turno de corte
	Baja	Media	Alta	años
Nuevos clones mejorados	14-18	18-23	24-30	8-12
Soveny Americano	5-9	10-14	15-20	14-25

Fuente: Cerrillo, T (2021)

A su vez, cada uno de los siete nuevos clones, en función de sus características, pueden ser utilizados para otros propósitos como sistemas silvopastoriles, restauración ambiental y apicultura entre otros.

3.3. Productos de Madera Recolectada (PMR) (Harvested Wood Products)

Los productos de madera recolectada (PMR) es una categoría que no ha sido aún incorporada en los inventarios GEI. La misma constituye una fuente de captura de carbono en stocks de productos cuyos plazos de emisión exceden el año. En los inventarios GEI, la extracción de madera tiene dos destinos: combustible (leña o carbón) o madera propiamente dicha. La madera con destino a la industria del papel, mueblería y construcción es tratada como una emisión del año. Este procedimiento no es preciso ya que estos productos de madera permanecen en el

tiempo, en plazos cortos para los productos de la industria del papel (5 años) y más extensos para mueblería, construcción y otros usos (desde 20 a 100 años) (IPCC, 2006).

El capítulo 12 del Volumen 4 de la directriz IPCC 2006 provee lineamientos para la estimación de los Productos de Madera Recolectada (PMR)⁵⁶. Las variables para tener en cuenta son los PMR contenidos en los "productos en uso" (o en servicio) y los PMR descartados (SEDS). A su vez debe considerarse en la contabilización de PMR, las entradas al país provenientes de importaciones y las salidas por exportaciones.

La metodología IPCC 2006 prevé niveles de complejidad de cálculo en función de la disponibilidad de información. Para nuestro país, se consideraron las metodologías de Nivel 1 (Tier 1). A modo de ejemplo, y con el fin de conocer el orden de magnitud de esta categoría, y refinar su cálculo en futuros inventarios, se incluye a continuación una estimación de la fijación de carbono anual por productos de madera recolectada sobre la base del BUR 2 correspondiente al inventario de GEI del año 2014 de la Argentina.

Para el año 2014 se estimaron las absorciones de PMR provenientes de una fracción de la madera industrializada y consumida en el país, sin considerar los PMR entrantes por importaciones y salientes por exportaciones, por falta de registros oficiales. No se contó con información del volumen de PMR en SEDS, aunque se asume que las emisiones de metano correspondientes están incluidas en el "Sector Residuos" del citado BUR.

En términos de las variables definidas por la directriz 2006 en el Cuadro 12.1 (Volumen 4, IPCC 2006), se contabilizaron las capturas por cambio anual en las existencias de carbono de PMR

⁵⁶ Según explica la directriz IPCC 2006: "Las Directrices del IPCC de 1996 (Vol. III, p.5.17, Recuadro 5) no proporcionaron métodos para estimar el carbono retenido en los PMR y recomendaron, a los fines de efectuar cálculos básicos, una hipótesis por defecto expresada como «...toda la biomasa de carbono recolectada se oxida en el año de la extracción [cosecha]». Esto se basó en la percepción de que las existencias de PMR no cambian. Es decir, el flujo de entrada y de salida anual de carbono para el reservorio de PMR se suponía igual y se podría reemplazar la oxidación de las existencias de productos de madera preexistentes (y, por lo tanto, omitirse) mediante una oxidación implícita justo después de la cosecha. (...)»

Puesto que, en general, las entradas no equivalen a las salidas y que el carbono puede permanecer almacenado en los PMR por largos periodos, es necesario tomar en cuenta este tiempo de almacenamiento al proporcionar directrices para estimar el aporte de los PMR a las emisiones/absorciones de CO₂ del sector AFOLU.

Los PMR incluyen todo el material de madera (incluida la corteza) que abandona los sitios de recolección. La broza y otro material que queda en los sitios de recolección no se considera PMR y debe considerarse materia orgánica muerta en la categoría correspondiente de uso de la tierra de los Capítulos 4, 5, 6, 8 y 9 de las Directrices. Los PMR constituyen un reservorio de carbono. El tiempo durante el cual se conserva el carbono en los productos varía según el producto y sus usos. Por ejemplo, la madera combustible y los residuos de la planta pueden quemarse en el año de la cosecha; es probable que muchos tipos de papel tengan una vida útil en usos de menos de 5 años, lo cual puede incluir el reciclado del papel; y la madera aserrada o los paneles usados en edificios pueden conservarse durante décadas, hasta más de 100 años. Los PMR descartados pueden depositarse en sitios de eliminación de desechos sólidos (SEDS), donde pueden persistir por periodos prolongados. Debido a este almacenamiento en productos en uso y en los SEDS, la oxidación de los productos de madera recolectada en un año dado puede ser menos, o quizá más, que la cantidad total de madera recolectada en tal año. En todo el mundo –según un estudio realizado por Winjum et al. (1998) y un informe de la secretaria de la CMNUCC (2003)- la cantidad de carbono que se conserva en los productos de madera recolectada tiende a aumentar.

contenidos en los "Productos en uso", Variable 1.A (Tabla 35). No se contabilizaron los productos en la variable 1.B, PMR en SEDS, aunque las emisiones de CH₄ provenientes de su descomposición estarían incluidas en el sector "Residuos". Tampoco se incluyen las variables PIM y PEX correspondientes a entradas o salidas de carbono por importaciones y exportaciones, respectivamente.

Tabla 35: Cuadro 12.1 de la directriz IPCC 2006 - Variables utilizadas para el cálculo de PMR

CUADRO 12.1 VARIABLES DE PMR USADAS PARA ESTIMAR EL APOORTE DE PMR ANUAL A LAS EMISIONES/ABSORCIONES DE CO ₂ DEL SECTOR AFOLU		
Definición de la variable	Nombres de las variables	
	PMR contenidos en los «productos en uso»	PMR en SEDS
1. Cambio anual en las existencias de carbono en a) PMR en uso y b) en PMR en sitios de eliminación de desechos sólidos en el país declarante; se trata del contenido de madera proveniente del consumo nacional de productos, $\Delta C_{PMR_{DC}} = \Delta C_{PMR_{IU_{DC}}} + \Delta C_{PMR_{SEDS_{DC}}}$	Variable 1A $\Delta C_{PMR_{IU_{DC}}}$	Variable 1B $\Delta C_{PMR_{SEDS_{DC}}}$
2. Cambio anual en las existencias de carbono en a) PMR en uso y b) en PMR en sitios de eliminación de desechos sólidos donde la madera de los productos provino de la cosecha nacional ; árboles cosechados en el país declarante, lo que incluye PMR exportados a otros países, $\Delta C_{PMR_{DH}} = \Delta C_{PMR_{IU_{DH}}} + \Delta C_{PMR_{SEDS_{DH}}}$	Variable 2A $\Delta C_{PMR_{IU_{DH}}}$	Variable 2B $\Delta C_{PMR_{SEDS_{DH}}}$
3. Carbono en las importaciones anuales de PMR al país declarante, incluido todo el material basado en la madera: rollizos, productos macizos, papel, pulpa y papel recuperado	P_{IM}	
4. Carbono en las exportaciones anuales de PMR desde el país declarante, incluido todo el material basado en la madera: rollizos, productos macizos, papel, pulpa y papel recuperado	P_{EX}	
5. Carbono en la cosecha anual de rollizos para productos – madera eliminada de los sitios de recolección en el país declarante, incluida la madera combustible	H	

Fuente: Directriz IPCC 2006

Por lo tanto, las capturas de carbono por PMR correspondieron a una fracción de la "Producción forestal del año". La cantidad estimada como flujo de entrada anual, representa el 55% de productos de madera industrializables puestos en servicio, estimados por el MAyDS. Esto corresponde al valor de eficiencia promedio de conversión de materia prima de los sectores foresto industriales (aserrado, laminado, flaqueado). No se consideró el volumen destinado a celulosa en la industria del papel y la oxidación de los productos se estimó considerando el valor por defecto de una vida media de 30 años para madera sólida. Los detalles del cálculo se encuentran en el informe preliminar del BUR 2 para el sector AFOLU (SAyDS, 2017).

Tomando como año inicial el 2010, se calcularon las capturas por PMR cosechados para el período 2010- 2014 (Tabla 36). Los PMR representaron entre el 19 y 20% de las emisiones por extracciones de la biomasa forestal, de tierras forestales que permanecieron como tales. Esto significa que una parte de las extracciones que permanecen como PMR, corresponderían a capturas de carbono y no se contabilizarían como emisiones del año. Esto implicaría una subestimación en el cálculo de las capturas de carbono en la categoría bosques implantados del 20%. Además de ser relevante para el impulso del uso creciente de PMR en sectores como la construcción y otras industrias. El BUR 2016 recalculó la serie histórica de la categoría bosques implantados, debido a una rectificación del área forestada para el periodo 1990-2016, proveniente del MAGyP de la nación.

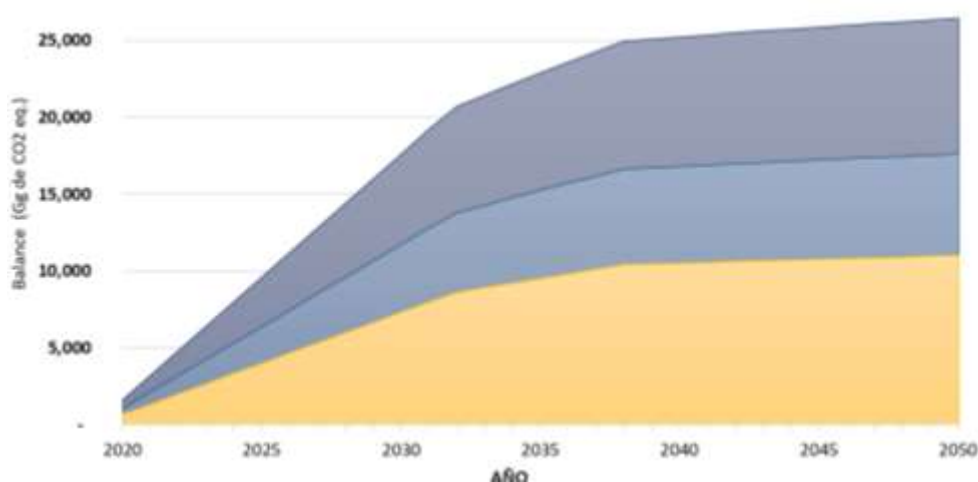
Si se incluye la categoría PMR en la captura de carbono al 2050 por incremento en el área forestada de acuerdo a los escenarios bajo, medio y alto (10.000, 40.000 y 60.000 ha/año), manteniendo la proporción de productos maderables, en forma global, se podría estimar en un 20% más de secuestro en bosques implantados.

Tabla 36: Estimación de las emisiones por cambios en la biomasa forestal considerando capturas en productores de madera recolectada (PMR) para el período 2010-2014

Emisiones por Cambios en la Biomasa Forestal							
Año	Absorción (Crecimiento) (Gg CO ₂)	Emisión por extracción (Gg CO ₂)	Emisión Neta (Gg CO ₂)	PMR (Gg CO ₂)	% de PMR del total de emisiones por extracción (Gg CO ₂)	Emisión por extracción restando PMP (Gg CO ₂)	Emisión Neta considerando PMR (Gg CO ₂)
2010	33,558	30,346	(3,213)	5,755	19%	24,591	(8,968)
2011	33,585	33,169	(416)	6,402	19%	26,767	(6,818)
2012	33,612	35,992	2,381	7,048	20%	28,944	(4,668)
2013	33,636	36,184	2,548	7,233	20%	28,950	(4,685)
2014	33,627	29,990	(3,638)	5,574	19%	24,415	(9,212)

Fuente: SAyDS, 2017

Figura 37: Proyección de captura neta de CO2 de la categoría Bosques implantados en 3 escenarios (bajo, medio y alto) considerando los stocks estimados de PMR



Fuente: Elaboración propia

4 Síntesis de principales resultados

A partir del análisis realizado en torno a las medidas de mitigación para los sectores cultivos agrícolas, ganadería bovina y sector Forestal, podemos resumir que la meta de máxima sería alcanzar la carbono neutralidad al año 2050, implementando todas las medidas de mitigación identificadas. Tanto aquellas que reducen las emisiones totales como las que reducen las intensidades de emisión.

Hemos identificado la forestación como la medida que mayor impacto tiene, pero también existen barreras para alcanzar los niveles buscados de área forestada al 2050. En segundo lugar el secuestro de carbono en el suelo tiene un potencial significativo pero es también complejo de alcanzar. El resto de las medidas son de menor impacto, pero no por eso menos importantes, ya que no sólo son compatibles con la mejora de los sistemas de producción y su sostenibilidad, sino también con el crecimiento económico del sector en muchas de las regiones del país.

De cara al **2050**, el escenario más ambicioso en términos de reducción de emisiones totales, y apuntando a la **carbono-neutralidad**, consistiría en la **necesidad de implementar lo siguiente**:

1. Aumentar en 8 millones de hectáreas el área forestada.
2. Adopción al 100% de la urea "no volátil".
3. Aplicación de Biochar (pellets al 50%) en el 60% de la superficie frutícola.

4. Desarrollo y consolidación de prácticas de manejo y conservación, adaptadas a cada región, en ganadería y agricultura, que permitan pasar de una reducción en las emisiones a un incremento en los niveles de secuestro de carbono. En agricultura buscando la máxima producción de biomasa y la mayor ocupación con gramíneas en los ciclos agrícolas (rotaciones). En ganadería, mediante sistemas de pastoreo y mejoramiento forrajero. Esto último está estrechamente relacionado con la mejora en los índices reproductivos y la reducción de intensidad de emisiones.

Las Tabla 37 y Tabla 38 siguientes comparan el escenario "Alto" de mitigación, planteados inicialmente y el escenario "aumentado" para llegar a un balance "carbono neutral" para el sector AFOLU. Las mismas resumen el potencial de mitigación de estas 4 acciones:

- Bosques y Productos de Madera Recolectada (PMR) : se plantean dos alternativas:
 - Máxima mitigación por el Incremento de 60.000 ha /año de superficie forestada
 - Carbono-neutralidad por el incremento medio de 270.000 ha
- Inhibidores de Volatilización Urea: Adopción del 100% y del 70% de Urea NBPT al 2050
- C en Suelos Agrícolas y Ganaderos: Reducción estimada en base a Frolla et al (2021) *Argentina: SOC Sequestration Potential Map*.
- C en Suelo – Biochar (IPCC 2019): aplicación de pellets con 50% de Biochar en el 25% o 60% de la sup frutícola nacional -

Tabla 37: Estimación del potencial de Mitigación al 2050, considerando un alto incremento en el área de bosques implantados (periodo 2020-2050)

Escenarios	Escenario de Mitigación alto	
	Promedio MtCO ₂ e/año	Acumulado al 2050 MtCO ₂ e
Incremento del Área de Bosques y PMR - 60.000 ha/año	19.20	576.0
Inhibidores Volatilización Urea	0.31	9.2
Carbono Suelos Agrícolas y ganaderos	16.70	501.0
C en Suelo- aplicación de Biochar	1.36	40.8
Reducción de emisiones Totales	37.57	1,127.0
Totales AFOLU BUR 3 (2016)-MtCO₂e/año	135.63	
% de Mitigación equivalente al total de emisiones de AFOLU año 2016	27.70%	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 38: Estimación del potencial de Mitigación de las medidas necesarias para alcanzar carbono neutralidad al 2050, considerando un alto incremento en el área de bosques implantados (periodo 2020-2050)

Escenarios	Escenario C Neutral al 2050	
	Promedio MtCO ₂ e/año	Acumulado al 2050 MtCO ₂ e

Bosques y PMR - Incremento de 8 millones ha al área actual	127.59	4.338.0
Inhibidores Volatilización Urea	0.31	9.2
Carbono Suelos Agrícolas y ganaderos	16.70	501.0
C en Suelo- aplicación de Biochar	1.36	40.8
Reducción de emisiones Totales	145.96	4,889.0
Emisiones Totales AFOLU Proyectado a 2050- Sin Bosques Implantados -MtCO₂e/año	155.51	4,936.0
% de Mitigación Equivalente al total de emisiones de AFOLU al año 2050		99.0%

Fuente: Elaboración propia

En relación las medidas de reducción en la **intensidad de emisiones**, se identificaron en agricultura el uso de tecnologías PGPR en agricultura, y en ganadería la mejora en la tasa de extracción del rodeo.

Este grupo de medidas son relevantes ya que permiten incrementar la producción sin incrementar la superficie o el uso de fertilizantes. En ganadera apuntan a aumentar la producción de carne sin incrementar el stock de vientres, generando un incremento leve en las emisiones de metano, pero logrando una reducción más que proporcional en las emisiones por unidad de producto (kg CO₂eq/kg RcH).

Tabla 39: Potencial de reducción en la intensidad de emisiones (emisiones por unidad de producto) para cultivos agrícolas por uso de PGPR y mejoras en la productividad en sistemas ganaderos

Escenarios	Unidades	Año Base	Intensidad al 2050		
		BAU	Alto	Medio	Bajo
Tecnologías PGPR	MtCo ₂ e/tn	123.56	120.95	117.65	115.26
Sistemas Ganaderos -kg	kg CO ₂ eq/kg RcH,	24.30	19.30	21.00	24.20

Fuente: Elaboración propia

Los escenarios evaluados para la reducción en la intensidad de emisiones fueron:

1. **Tecnologías PGPR:** Incremento del 7% en rendimiento con adopciones graduales que llegarían al 30%, 70% y 100% al 2050. aumentan la productividad sin incrementar el uso de fertilizantes
2. **Ganadería Bovina:** 3 escenarios de tasas crecientes de extracción del rodeo bovino de carne (Tasa de destetes y peso de faena)

En ganadería, una mejora en la Intensidad de Emisiones implicaría un aumento en las "emisiones totales", según el escenario proyectado de alta, media o baja mejora en la Tasa de extracción, del orden de 15.8, 12.4 y 4.8 MtCO_{2e}/año respectivamente. Estarían parcialmente compensadas por las emisiones totales reducidas en Suelos Agrícolas (C en suelo y fertilización)

Este resumen de medidas alineadas con una meta de carbono neutralidad, serían la base para la elaboración de propuestas de medidas e instrumentos que impulsen su implementación al 2050.

Con relación a la factibilidad de implementación, informes previos de este proyecto⁵⁷ ofrecen una detallada información sobre las barreras que se deben abordar para poder implementar y potenciar las acciones propuestas.

Como concepto general, las tecnologías de insumos (PGPR, Inhibidores de volatilización y uso de Biochar) tienen un costo y un beneficio relativamente sencillo de cuantificar. Por otro lado, las tecnologías de "Procesos" que se relacionan con la adopción de prácticas de manejo en agricultura (rotaciones adecuadas y cultivos de servicios) y en ganadería, puede señalarse que tienen un "costo cero" de implementación para el productor, pero serán incorporadas en la medida que sean rentables.

Paralelamente, es necesario incentivar la adopción de buenas prácticas y su difusión. Recientemente, la provincia de Córdoba ha implementado un programa de incentivos de Buenas Prácticas agrícolas.

Con relación a los costos de implementación, algunas acciones pueden ser estimadas en términos económicos. En el caso de utilizar Urea NBPT, el costo "extra" para el productor sería alrededor de 50 USD/tn, por encima del precio de la urea común. De este modo, una forma lineal de estimar este costo sería multiplicar el consumo de urea por 50 USD/tn y afectarlo anualmente por su grado creciente de adopción. Estimando un consumo medio anual de 2.160.000 toneladas de urea para el período 2020-2050, el costo de la tecnología representaría, a valores actuales, 108 millones de dólares por año, considerando una adopción del 100% por parte de la producción agrícola.

En relación con tecnologías PGPR, hay varios productos y su costo oscila alrededor de los 5 USD/ha. El costo extra podría estimarse multiplicando la superficie cultivada con cereales y soja y su nivel de adopción anual. Considerando la proyección del incremento del área cultivada con cereales y soja, la superficie promedio para el periodo 2020-2050 sería de 42 millones de

⁵⁷ Act I AR 1 *Barrier Analysis*; Act III AR 1 y AR 2 *Multi-stakeholder dialogues*

hectáreas. Un escenario de adopción total de estas tecnologías representaría un valor máximo de inversión anual de 210 millones de dólares.

En ganadería se estimaron escenarios de mejora (alto, medio y bajo) que implican niveles crecientes de eficiencia de productividad del rodeo nacional. Este objetivo implica principalmente el impulso de programas de producción de carne que difundan e incentiven la adopción de tecnologías de manejo (procesos reproductivos, nutricionales y sanitarios). Esta suerte de conjunto de buenas prácticas ganaderas, implicaría en cierto modo un "costo cero" para el productor, pero no para el Estado que debe invertir en dichos programas a través de instituciones y organismos (INTA, SENASA etc.).

En Bosques cultivados, el potencial de mitigación se estimó considerando escenarios (alto, medio y máximo) de incremento del área forestada anual para el periodo en estudio. El costo de esta acción estaría básicamente centrado en asegurar presupuesto a la ley de Promoción forestal 25.080 y sus modificaciones posteriores. Pero sobre todo incentivar la demanda de productos forestales por parte de la industria, lo cual fue identificado como principal barrera para esa cadena de valor.

VIII. Referencias

- Achim Zeileis, Torsten Hothorn (2002). *Diagnostic Checking in Regression Relationships*. *R News* 2(3), 7-10. URL <https://CRAN.R-project.org/doc/Rnews/>
- Agencia Internacional de la Energía: *Global EV Outlook 2021: Accelerating ambitions despite the pandemic*, abril 2021
- Alcott, B. *Historical Overview of the Jevons paradox in the Literature*. 2008.
- Aldy, J. y R. Stavins (2008): "Economic incentives in a new climate agreement", Paper, Belfer Center for Science and International Affairs, May 7, 2008
- Azqueta, D. (2007): *Introducción a la Economía Ambiental*, Ed. Mc Graw Hill, Madrid
- *Balance Energético Nacional de Argentina 2019*. Subsecretaría de Planeamiento Energético, 2020.
- Barbieri, P.A.; H.E. Echeverría, H.R. Sainz Rozas y M. Maringolo. 2010. *Fertilización de maíz con urea de liberación lenta: pérdida por volatilización y eficiencia de uso de nitrógeno*. *Ciencia del Suelo*, 28 (1): 57-66.
- Bisang, R., R.Brigo, A.Lodola y F Morra . 2018 *Cadenas de valor agroalimentarias: evolución y cambios estructurales en el siglo XXI / Agustín Lódola ... [et al.]. -1a ed adaptada. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires / Secretaría de Gobierno de Agroindustria - Dirección General de Programas y Proyectos Sectoriales y Especiales (DIPROSE), 2018.*
- Blanco, A. "Empresas de Servicios Energéticos y Financiamiento de la Eficiencia Energética Estado de Situación y Perspectivas en la Región", Comisión Económica para América Latina (CEPAL).
- Bohm, P. y C. Rusell (1985): "Comparative analysis of alternative policy instruments", en A. Kneese y J. Sweeney (eds) (1985): *Handbook of Natural Resource and Energy Economics*, North-Holland, Amsterdam
- Borodowski, E. y Suárez, R. 2004. *El cultivo de álamos y sauces: su historia en el Delta del Paraná*. *SAGPyA Forestal* N° 32: 5-13.
- Carlino, H, Carlino, M y otros:2020. *Current understanding of the impact of Carbon Dioxide Removal (CDR) approaches on the SDGs in LAC*
- Cerrillo, T. 2021. *El sauce: un forestal estratégico para el Delta y con potencial para otras regiones del país*. Hoja Informativa N° 26 INTA. Acceso <https://maderamen.com.ar/desarrollo-forestal/2021/05/11/sauce-forestal-estrategico-para-el-delta-y-potencial-para-otras-regiones/>
- Ciampitti I.A. y F.O. García. 2007. *Requerimientos nutricionales, absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios. I Cereales, Oleaginosos e Industriales*. *Informaciones Agronómicas* N° 33, Archivo Agronómico N° 11. IPNI
- Coremberg, A, Ramos, A, Gerchunoff, P., Heymann, D. *PIB Argentina 1900-2012: En búsqueda de una tendencia de crecimiento sostenible*, VII Congreso Internacional de Economía y Gestión ECON 2013, Facultad de Ciencias Económicas UBA. <https://arklems.org/pbi/>
- Cortizo, S. 2005. *Álamos en el Delta del Paraná. En Mejores Árboles para más forestadores. El Programa de Producción de Material de Propagación Mejorado y el Mejoramiento Genético en el Proyecto Forestal de Desarrollo*. Buenos Aires. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos: 137-160.
- Cowan N, Carnell E, Skiba U, Dragosits U, Drewer J, Levy P. 2020. *Nitrous oxide emission factors of mineral fertilisers in the UK and Ireland: a Bayesian analysis of 20 years of experimental data*. *Environ Int.* 135:105366. doi:10.1016/j.envint.2019.105366
- Duval, R. (2008): "A taxonomy of instruments to reduce greenhouse gas emissions and their interactions", OECD, Economics Department Working Paper N° 636, ECO/WKP(2008)44s

- Edsel A. Pena and Elizabeth H. Slate (2019). *gvlma: Global Validation of Linear Models Assumptions*. R package version 1.0.0.3. <https://CRAN.R-project.org/package=gvlma>
- *Eficiencia Energética en Argentina: "Lecciones para el Plan Nacional de Eficiencia Energética Argentina (PlanEEAR) Experiencia Internacional en el Desarrollo de Planes y Acciones de Eficiencia Energética"*, 2019
- ENARGAS. *Datos operativos de Transporte y Distribución de Gas, Sección 3. Numeral 3.1, Gas entregado por tipo de usuario*. <https://www.enargas.gob.ar/secciones/transporte-y-distribucion/datos-operativos-sec.php?sec=3>
- Feldkamp, C.R., F. Torroba, G. Vazquez Amabile, S. Galbusera y P. Cañada. 2014. *Sistemas ganaderos y los factores de emisión de Gases de Efecto Invernadero*, en: *Suelos, producción agropecuaria y cambio climático: avances en la Argentina* Eds C. Pascale Medina ; M.M. Zubillaga ; M. A.Taboada. 1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires : Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación, 2014.
- Ferraris, G., L. Couretot y M. Toribio. 2009. *Pérdidas de nitrógeno por volatilización y su implicancia en el rendimiento del cultivo de maíz en Pergamino (Bs As). Efectos de fuente, dosis y uso de inhibidores*. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. IPNI. N°41.
- Goulder, L. y I. W. H. Parry (2008): "Instrument Choice in Environmental Policy", *Review of Environmental Economics and Policy*, 2(2): 152-174, doi: 10.1093/leep/ren005
- Hilbert, J. y Caratori, L. *El potencial de los biocombustibles argentinos para contribuir al cumplimiento de las contribuciones de Argentina en el marco del Acuerdo de París*. INTA-FTDT, 2021 (in press).
- IEA/OECD (1997): *Energy and Climate Change: An IEA Source-Book for Kyoto and beyond*, International Energy Agency & Organisation for Economic Co-operation and Development, IEA/OECD, Paris
- *Informe Bienal de Actualización de la República Argentina - Segundo Informe (BUR 2)*, 2014. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/cambio-climatico/segundo-informe-bienal>
- *Informe Bienal de Actualización de la República Argentina - Tercer Informe (BUR 3)*, 2016. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/cambio-climatico/tercer-informe-bienal>
- *Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. Población (INDEC) estimada al 1 de julio de cada año calendario por sexo. Años 2010-2040*. <https://www.indec.gob.ar/indec/web/Nivel4-Tema-2-24-84>
- *Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. Población (INDEC). Series trimestrales de oferta y demanda globales. Años 2004-2021*. <https://www.indec.gob.ar/indec/web/Nivel4-Tema-3-9-47>
- INTA EEA Concordia . 2012 .*Resúmenes Jornadas de Actualización Técnica Mejoramiento Genético de Pinos y Eucaliptos Subtropicales / edición literaria a cargo de Juan A. Lopez... [et.al.]*. - 1aed. - EEA Concordia : Ediciones INTA, 2012. 100 p.. ISBN 978-987-679-144-1
- IPCC 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., and Tanabe K. (eds). Publicado por: IGES, Japón. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/index.html>
- Keohane, N. O.; Revesz, R. L. y R. Stavins (1998): "The Choice of Regulatory Instruments in Environmental Policy", *Harvard Environmental Law Review*, 22(2):313-67
- Khazzoom, J.D. *Economic Implications of Mandated Efficiency in Standards for Household Appliances*. *The Energy Journal*, 1980.
- Kneese, A. V. y B. T. Bower (1968): *Managing Water Quality: Economics, Technology, Institutions*, Johns Hopkins Press
- *Mastronardi, L y Caratori, L (eds.). Escenarios Energéticos de Argentina al 2030 – Edición 2019*. Subsecretaría de Planeamiento Energético, 2019.
- MTEySS – SSPEyE - *Dirección General de Estudios y Estadísticas Laborales, en base a EPH (INDEC)*.

- Newell, R. G. y W. A. Pizer (2008): "Indexed regulation," *Journal of Environmental Economics and Management*, 56(3): 221-233, doi: 10.1016/j.jeem.2008.07.001
- OECD (1991): *Environmental Policy: How to Apply Economic Instruments*, OECD, Paris
- OECD (1997a): *Economic/Fiscal Instruments: Competitiveness issues related to Carbon/Energy Taxation*, Annex Expert Group on the United Nations Framework Convention on Climate Change, Working Paper no. 14, OECD, Paris
- OECD (2021), *Real GDP long-term forecast (indicator)*. doi: 10.1787/d927bc18-en (Accessed on 03 July 2021)
- Pizer, W. A. (2002): "Combining price and quantity controls to mitigate global climate change," *Journal of Public Economics*, 85(3): 409-434, doi: 10.1016/S0047-2727(01)00118-9
- R Core Team (2019). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- Ragonese, A.E. 1993. *Fitotecnia de salicáceas en el Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias*. INTA, Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria. Tomo XLVII N° 2: 35 pp
- SAGPyA-INTA-UCAR. 2015 *Domesticación y mejoramiento de especies forestales*. 201pp.
- Secretaría de Energía. *Refinación y Comercialización de petróleo, gas y derivados (Tablas Dinámicas)*. SESCO Upstream. <http://datos.minem.gob.ar/dataset/refinacion-y-comercializacion-de-petroleo-gas-y-derivados-tablas-dinamicas> Consultado en junio de 2021.
- Secretaría de Gobierno de Energía: *Escenarios Energéticos 2030*, edición 2019.
- Thomas Lumley based on Fortran code by Alan Miller (2020). *leaps: Regression Subset Selection*. R package version 3.1. <https://CRAN.R-project.org/package=leaps>.
- UNEP- RISOE Centre - AACREA (Coordinado por MinCyT). 2013. *Technology Needs Assessment for Climate Change Mitigation and Adaptation in Latin America* - "REPORTE IV SECTOR AGRICULTURA. 2013. Tecnologías para optimizar el uso del Nitrógeno en las actividades agrícolas-ganaderas" en Evaluación de Necesidades Tecnológicas ante el Cambio Climático, Informe Final sobre Tecnologías de Mitigación, págs. 387-511. <https://tech-action.unepdtu.org/wp-content/uploads/sites/2/2013/12/informeent-mitigacion-argentina-13.pdf>
- Vazquez Amabile, G., S. Galbusera, C. R. Feldkamp, F. Torroba, R. M. Baliña. 2014. *Evaluación de necesidades tecnológicas para la mitigación de emisiones de gases efecto invernadero*. En: "Suelos, producción agropecuaria y cambio climático: avances en la Argentina" Eds C. Pascale Medina ; M.M. Zubillaga ; M. A. Taboada. 1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires : Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación, 2014.
- Webster, M.; Sue Wing, I. y L. Jakobovits (2010): "Second-Best Instruments for Near-Term Climate Policy: Intensity Targets vs. the Safety Valve," *Journal of Environmental Economics and Management* 59: 250-259, doi: 10.1016/j.jeem.2010.01.002