



**“ANÁLISIS ECONÓMICO DE ALTERNATIVAS PARA
CUMPLIMIENTO DEL COMPROMISO NACIONAL DE MITIGACIÓN
DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL SECTOR AGRÍCOLA DEL PERÚ
AL 2030”**

**Trabajo de investigación presentada para optar por el grado académico de
Magíster en Economía**

**Presentado por
Ing. Andrea Ximena Gómez Lavi**

Asesor: PhD. Daniel De La Torre Ugarte Pierrend

[0000-0002-3835-0458](tel:0000-0002-3835-0458)

Lima, noviembre 2020

Dedicatoria

Dedicada a los agricultores del Perú, quienes tienen el gran reto de continuar alimentando al país sin incrementar sus emisiones de carbono ni perjudicar su propia economía; y a todos los que trabajan por el desarrollo sostenible.

Agradecimientos

Gracias a mi asesor, PhD. Daniel De La Torre Ugarte, por su acompañamiento y consejos. Gracias a mi familia, mis seres queridos y amigos por la paciencia en este proceso y la motivación constante para seguir adelante. Sobre todo, gracias a Dios.

Tabla de contenido

Título del Trabajo de Investigación	6
Resumen Ejecutivo	6
Capítulo I: Introducción y motivación	7
Capítulo II: Marco Teórico	10
II.1 Cambio Climático y Ciclo del Carbono	10
II.1.1 Emisiones de Carbono	10
II.1.2 Capturas de Carbono	13
II.2 Compromiso Nacional de Mitigación	13
II.3 Mecanismos de mitigación del cambio climático	16
Capítulo III: Metodología	18
III.1 Estructura del Modelo	18
III.2 Datos y supuestos	22
III.3 Limitaciones	24
Capítulo IV: Análisis de resultados	25
IV.1 Proyección Base	25
IV.2 Alternativa de Costos	27
IV.3 Alternativa de Precios	30
IV.4 Alternativa de Costos y Precios	33
IV.5 Análisis Comparativo	35
Conclusiones y sugerencias	39
Bibliografía	41
Anexos	44
Anexo 1. Incentivo perverso de los fertilizantes chinos.....	44
Anexo 2. Oportunidades de reducción de emisiones agrícolas en LAC	44
Anexo 3. Precios del año base.....	45
Anexo 4. Rendimientos del año base	45
Anexo 5. Tierra cultivada del año base	46
Anexo 6. Límites mínimos y máximos para variación de tierras cultivadas	46
Anexo 7. Factores de GEI según categoría y fuente de emisión	47
Anexo 8. Porcentajes de consumo de fertilizante por cultivo y tipo de fertilizante	48
Anexo 9. Participación de factores de producción en estructura de costos (%), 2016.....	49
Anexo 10. Evolución detallada de superficie del escenario base y mecanismos (ha), 2016 – 2030	50
Anexo 11. Evolución detallada de emisiones del escenario base y mecanismos (Gg de CO ₂ e), 2016 – 2030.....	51

Índice de Tablas

Tabla 1. Fuente de emisión y tipo de GEI según fuentes de emisión	10
Tabla 2. Fuentes de emisión agrícolas y pecuarios y su representatividad en sector agropecuario	14
Tabla 3. Fuentes de emisión agrícolas y su representatividad en sector	14
Tabla 4. Clasificación de condiciones habilitantes para medidas de mitigación	16
Tabla 5. Categorías de productos agrícolas ordenadas	20
Tabla 6. Alternativas de mitigación.....	24
Tabla 7. Resumen de la Alternativa de Costos	28
Tabla 8. Resumen de la Alternativa de Precios.....	32
Tabla 9. Resumen de la Alternativa de Costos y Precios	34
Tabla 10. Cambios en superficie cultivada nacional con respecto a Proyección Base en el 2030	36

Índice de Gráficos

Gráfico 1. Evolución de emisiones agrícolas por fuente, 2000 – 2016.....	13
Gráfico 2. Dominios del modelo	20
Gráfico 3. Dinamización del modelo agrícola	22
Gráfico 4. Representatividad en emisiones vs superficie cultivada por categoría de cultivo, 2016 (%)	26
Gráfico 5. Emisiones de carbono agrícola por dominios, 2016-2030 (Gg de CO ₂ e).....	26
Gráfico 6. Cambio de superficie cultivada en dominios priorizados, 2016-2030 (%)......	26
Gráfico 7. Emisiones de carbono agrícola por dominios bajo Alternativa de Costos, 2016-2030 (Gg de CO ₂ e)	28
Gráfico 8. Cambio de superficie cultivada en dominios priorizados bajo Alternativa de Costos, 2016-2030 (%).....	29
Gráfico 9. Emisiones de carbono agrícola por dominios bajo Alternativa de Precios, 2016-2030 (Gg de CO ₂ e).....	31
Gráfico 10. Cambio de superficie cultivada en dominios priorizados bajo Alternativa de Precios, 2016-2030.....	31
Gráfico 11. Emisiones de carbono agrícola por dominios bajo alternativa de Costos y Precios, 2016-2030 (Gg de CO ₂ e)	33
Gráfico 12. Cambio en superficie cultivada en dominios priorizados bajo Alternativa de Costos y Precios, 2016-2030	34
Gráfico 13. Valor de producción agrícola bajo Alternativas de mitigación, 2016 – 2030 (soles)	35
Gráfico 14. Precios de productos no transables, 2016–2030 bajo Alternativas (S/. / kg).....	37
Gráfico 15. Cambios en ingreso agrícola anual con respecto a Proyección Base, 2016 – 2050.....	38

Título del Trabajo de Investigación

Análisis económico de alternativas para el cumplimiento del compromiso nacional de mitigación al cambio climático en el sector agrícola del Perú al 2030.

Resumen Ejecutivo

La presente investigación hace un análisis económico de alternativas para el cumplimiento del compromiso nacional de mitigar las emisiones en 13% en el sector agrícola del Perú para el 2030. La hipótesis plantea que, para reducir la cantidad de emisiones necesaria para cumplir con el compromiso nacional de mitigación, será suficiente implementar mecanismos que permitan (i) incrementar los costos productivos del cultivo de arroz, cultivo con la principal fuente de emisión, y (ii) incrementar los precios de los cultivos sustitutos del arroz, los cuales variarán entre regiones dada las condiciones ambientales de cada una.

Este análisis es de particular relevancia en el marco del Acuerdo de París, el cual ha sido ratificado por el Perú en el 2016 con el cual se compromete a reducir sus emisiones de carbono en todos los sectores productivos. Asimismo, el modelo permite a los tomadores de decisión prever el comportamiento de los diferentes cultivos y regiones del país al implementar alternativas de mitigación.

Para esto se desarrolla un modelo de equilibrio parcial basado en el modelo POLYSYS, el cual se caracteriza por contar con módulos de oferta restringida y ecuaciones de demanda. La oferta está definida por un modelo de programación lineal, en el cual se maximizan los beneficios netos, sujetos a restricciones de tierra y flexibilidad en el cambio de uso de suelo entre los productos agrícolas. Las ecuaciones de demanda están basadas en elasticidades y se utiliza el método Gauss – Seidel para resolver un sistema de ecuaciones simultáneas. La variable de decisión del modelo es tierra cultivada, la cual se decide en función de los costos de producción y el retorno esperado.

Los resultados analizados muestran que existen mecanismos viables que permiten tanto el aumento de costos de producción del arroz en 50%, como el incremento de precios de cultivos sustitutos entre 30% y 50% que conllevan una reducción de emisiones suficiente para el cumplimiento de la meta de 13% mitigación en el sector agrícola al 2030.

Capítulo I: Introducción y motivación

La falla de las acciones de mitigación del cambio climático es percibida como el riesgo global más probable y con el mayor impacto potencial, junto con los fenómenos climáticos extremos, según el último reporte de Riesgos Globales de World Economic Forum (2019). Por su parte, las Naciones Unidas ha ratificado la “acción por el clima” como uno de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que están en vigor desde el 2016. Mientras tanto, 195 países de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) han adoptado el Acuerdo del París en el 2015, cuya ratificación les compromete a mitigar sus emisiones nacionales de gases de efecto invernadero (GEI) (IPCC, 2014).

El Perú forma parte de los países que ratificaron el Acuerdo de París, con el que se compromete a generar 20% menos GEI que el proyectado para el 2030 en el escenario de referencia, el cual tiene como año base 2010. Este compromiso está definido como una contribución nacional que utiliza únicamente recursos económicos del Estado y contempla los sectores energía, procesos industriales, residuos, bosques, agricultura y ganadería. Asimismo, se determina que, de contar con recursos de fuentes de financiamiento adicionales, esta meta alcanzaría hasta el 30% de reducción. El sector agropecuario representa el 15% del total de emisiones nacionales, por lo que tiene un rol significativo en el cumplimiento de la meta del país (MINAM, 2016b). Si bien se han definido ciertas medidas potenciales para lograr las reducciones comprometidas, aún son inciertos los mecanismos para implementarlas y la respuesta de las variables socioeconómicas ante los cambios que puedan representar las medidas de mitigación.

En este contexto, se han iniciado esfuerzos nacionales por modelar la implementación de medidas de mitigación que permita reducir la incertidumbre de sus efectos en la economía nacional. En el 2012 como parte del proyecto Planificación para el Cambio Climático (PLANCC)¹, se utilizó un modelo de Equilibrio General Computable (CGE) para modelar los sectores de agricultura, silvicultura, transporte, desechos y procesos industriales, obteniendo 77 propuestas de mitigación, de las cuales 8 fueron para el sector agropecuario (PLANCC 2014). El siguiente modelo se desarrolló en el marco de la Alianza de Naciones Unidas para el Medio Ambiente en la Acción para la Economía Verde (PAGE)². Esta iniciativa utilizó el modelo T-21, basado en un enfoque de dinámica de sistemas para evaluar los impactos de políticas verdes en los sectores agricultura, silvicultura y transporte, de manera agregada.

¹ Proyecto liderado por los Ministerios de Medio Ambiente, Economía y Finanzas, Relaciones Exteriores y CEPLAN. Dos firmas consultoras, LIBELULA y APOYO

² El trabajo estuvo bajo la responsabilidad de la Universidad del Pacífico.

Si bien ambos modelos representan avances importantes en esta materia, tienen como principal limitación el insuficiente grado de especificidad de los resultados a nivel sectorial. Dado que los resultados de estos modelos son agregados, no permiten priorizar zonas dentro del territorio, ni explicar el aporte de emisiones de los diferentes componentes sectoriales. En este sentido, hay una necesidad de contar con un modelo que permita a los tomadores de decisión prever el comportamiento de emisiones de los diferentes cultivos y regiones del país al implementar alternativas de mitigación. Al contar con mayor especificidad, las medidas evaluadas pueden ser priorizadas por regiones y cultivos, lo cual favorece la eficiencia del gasto público destinado para esta materia.

El objetivo principal de esta investigación es realizar un análisis económico de alternativas que permitan el cumplimiento del compromiso nacional de mitigar en 13% las emisiones del sector agrícola del Perú para el 2030. Los objetivos específicos son: (a) priorizar las regiones con la mayor participación en la generación de emisiones, (b) identificar los cultivos con mayor potencial de sustituir al cultivo de mayor generación de emisiones en las regiones priorizadas, (c) determinar la intensidad necesaria de cada alternativa para alcanzar la meta nacional de mitigación en el sector agrícola. La hipótesis plantea que, para reducir la cantidad de emisiones necesaria para cumplir con el compromiso nacional de mitigación, será suficiente implementar mecanismos que permitan tanto (i) incrementar los costos productivos del cultivo de arroz, cultivo con la principal fuente de emisión, como (ii) incrementar los precios de los cultivos sustitutos del arroz, los cuales variarán entre regiones dada las condiciones ambientales de cada una.

En el capítulo II se encuentra el marco teórico relevante para esta investigación, presentando el ciclo del carbono en el sector agrícola, para entender la procedencia de las emisiones de GEI. También se describe el compromiso nacional de mitigación enmarcado en el Acuerdo de París y las características de las emisiones y medidas propuestas en el sector agrícola. Finalmente, el capítulo explora alternativas y mecanismos implementados en otros países para la descarbonización del sector abordando desafíos similares a los que encontramos en la realidad nacional.

En el capítulo III se describe la construcción del modelo de equilibrio parcial a utilizar en la investigación. El modelo organiza el territorio nacional en 7 dominios y segmenta el sector en 14 categorías de productos agrícolas, lo que permite contar con un análisis más específico a nivel de territorio y cultivos. Está basado en el modelo POLYSYS implementado en EEUU (De La Torre Ugarte y Ray, 2000) y se caracteriza por contar con módulos de oferta restringida y ecuaciones de demanda. La oferta está definida por un modelo de programación lineal, en el cual se maximizan los beneficios netos, sujetos a restricciones de tierra y flexibilidad en el cambio de uso de suelo entre los productos agrícolas. Las ecuaciones de demanda están basadas en elasticidades. La variable de decisión del modelo es tierra cultivada, la cual se decide en función de los costos de producción y el retorno esperado.

En este capítulo también se describe la forma de obtención de datos para la elaboración del año base, las proyecciones y las alternativas evaluadas.

Finalmente, en el capítulo IV se presentan los resultados obtenidos a nivel de emisiones de carbono y cambio en tierras cultivadas por dominio y categoría agrícola. Para comenzar, se priorizan las regiones con mayor participación en la generación de emisiones de carbono, para así evaluar los cultivos con mayor potencial de sustitución al cultivo de mayor generación de emisiones. Con estos resultados, se evalúan las alternativas propuestas en el modelo, se explican los mecanismos de mercado para alcanzarlas y se determina la intensidad necesaria de cada una para alcanzar las metas nacionales. Finalmente, se realiza un análisis comparativo de la evolución del PBI sectorial y de los precios en la proyección para cada alternativa desarrollada.

Capítulo II: Marco Teórico

II.1 Cambio Climático y Ciclo del Carbono

El cambio climático es una alteración del clima mundial ocasionado por la excesiva concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera. Los principales GEI que intensifican este fenómeno son el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y los nitratos (NO_x), los cuales tienen un potencial de calentamiento global (PCG) de 1, 23 y 310,4, respectivamente (IPCC 2014). Por convención internacional, para homogeneizar la medición de los niveles de emisión de estos gases, se utiliza la unidad de masa “dióxido de carbono equivalente” (CO₂e). Grandes cantidades de emisiones intensifican el cambio climático, mientras que las capturas de carbono tienen un efecto inverso, efecto conocido como “mitigación” del cambio climático. La reducción de emisiones también es considerada como una estrategia de mitigación del cambio climático.

Conocer el ciclo del carbono del sector es importante para comprender el rol que juega en el cambio climático y para la toma de decisiones con el objetivo de reducir su impacto. Las salidas de carbono se conocen como “emisiones”, y las entradas, como “capturas”. A continuación, se describen las fuentes de emisión y captura de carbono en el sector agrícola.

II.1.1 Emisiones de Carbono

Las emisiones agrícolas se generan a partir de cuatro fuentes de emisión directas y una indirecta según el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), (1) arrozales anegados (directa), (2) suelos agrícolas (directa e indirecta), (3) quema de residuos agrícolas (directa) y (4) quema de sabanas. La fuente de emisión “suelos agrícolas” agrega fuentes de emisión tanto agrícolas como ganaderas. En la Tabla 1 se muestran las fuentes de emisión provenientes directamente del sector agrícola, el tipo de GEI que emite, los cultivos contribuyentes y los drivers que influyen para cada una.

Tabla 1. Fuente de emisión y tipo de GEI según fuentes de emisión

Fuente de emisión	Tipo de gas	Cultivos contribuyentes	Driver
Arrozales anegados (directa)	Metano (CH ₄)	Solo arroz	Técnica de riego
Suelo agrícola – generación de residuos de cosechas (directa)	Nitrato (NO _x)	Todos	Tipo de cultivo
Suelo agrícola – aplicación de fertilizantes nitrogenados (directa e indirecta)	Nitrato (NO _x)	Todos	Tipo de fertilizante

Fuente de emisión	Tipo de gas	Cultivos contribuyentes	Driver
Suelo agrícola – cosecha de fijadores de nitrógeno transitorios (directa)	Nitrato (NO _x)	Solo legumbres	Cultivos fijadores de nitrógeno
Quema de residuos agrícolas (directa)	Metano (CH ₄) y Nitrato (NO _x)	Todos	Prácticas agrícolas
Quema de sabanas (directa)	Metano (CH ₄) y Nitrato (NO _x)	Independiente de cultivos	Prácticas agrícolas

Fuente: Elaboración propia con información del IPCC (2014)

- (1) Arrozales anegados: Una práctica común en los cultivos de arroz en el mundo es el riego por inundación durante la etapa de crecimiento del cultivo, siendo utilizada en cerca del 90% de los arrozales a nivel mundial (IPCC 2006). Bajo el área de inundación, la materia orgánica de los arrozales se degrada en ausencia de oxígeno, liberando metano. Los arrozales pueden inundarse por regadío, por seco o por aguas profundas. En el Perú, existen arrozales por regadío y por seco, las cuales se subdividen en riego por seco con aireación simple o múltiple. La cantidad de emisiones de los arrozales anegados dependerá además del clima, el tipo de suelo, cantidad de materia orgánica, entre otros.
- (2) Suelos agrícolas: Esta fuente de emisión agrupa las emisiones directas e indirectas de nitratos derivadas del “suelo”. Está compuesta por 4 actividades de emisión directa (3 agrícolas y 1 pecuaria) y 3 indirectas (1 agrícola y 2 pecuarias). Las actividades agrícolas que son parte de esta fuente de emisión son:
- Generación de residuos de cosecha: Los residuos de cosecha generan emisiones por descomposición de la materia orgánica y dependen básicamente del tipo de cultivo. Los cultivos que presentan una alta fracción de materia seca y una alta relación de residuo-producto (ejemplo: café y cacao) serán los que más GEI generen de esta fuente de emisión, y viceversa los cultivos con una fracción menor (ejemplo: tubérculos).
 - Aplicación de fertilizantes nitrogenados: esta actividad incluye emisiones directas e indirectas. Las emisiones directas incluyen la fracción de los nitratos que se liberan a la atmósfera y no son aprovechados por las plantas. En otras palabras, las emisiones de nitratos provenientes de fertilizantes, es inversamente proporcional a la eficiencia de aprovechamiento, la cual depende

de su composición química. Las emisiones indirectas provienen de la deposición atmosférica³ y la lixiviación⁴.

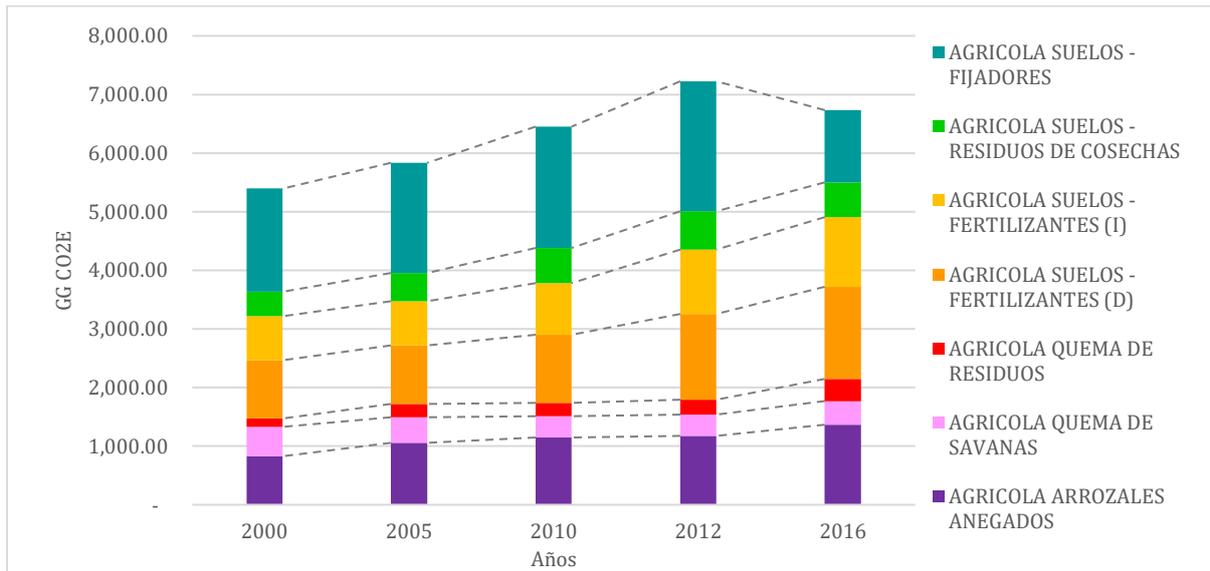
- Cosecha de plantas fijadoras de nitrógeno transitorias: Si bien, las especies que fijan nitrógeno en el suelo capturan nitratos durante su fase de crecimiento favoreciendo la captura de carbono, aquellas que son de naturaleza transitoria, vuelven a liberar los nitratos capturados al momento de la cosecha. Las plantas fijadoras de nitrógeno transitorias son las leguminosas (habas, frijoles, soya, entre otros), mientras que las especies permanentes fijadoras de nitrógeno suelen ser especies arbóreas (las acacias, el aliso, entre otros).
- (3) Quema de residuos agrícolas: La quema de los residuos en los campos es una práctica agrícola común, sobre todo en los países en desarrollo (IPCC 2006). Se estima que el porcentaje de los residuos de las cosechas quemados en los campos podría alcanzar el 40% en los países en desarrollo, siendo inferior en países desarrollados. Los gases que emite esta práctica agrícola incluye el metano, nitratos y dióxido de carbono. Se considera que el dióxido de carbono es reabsorbido por el cultivo en el siguiente periodo de crecimiento, por lo que en esta categoría se incluyen únicamente los otros dos gases.
- (4) Quema de sabanas: Las sabanas son formaciones tropicales y subtropicales que tienen una cubierta continua de hierba. El crecimiento de las sabanas está controlado por la alternancia de las estaciones húmeda y seca: la mayor parte del crecimiento se produce durante la estación húmeda. La época seca se caracteriza por sufrir de incendios tanto naturales como provocados. La frecuencia de la quema dependerá de la humedad del ecosistema y las prácticas agrícolas. Esta fuente de emisión genera básicamente nitratos.

En el gráfico 1 se observa el comportamiento que las emisiones han tenido en el periodo 2000 – 2016 según fuente de emisión agrícola. Se identifica una tendencia creciente hasta el 2012 y una ligera disminución de emisiones, principalmente explicada por las derivadas de los fijadores de nitrógeno.

³ Proceso por el cual sustancias químicas, tales como partículas contaminantes son transferidas de la atmósfera a la superficie de la tierra (Ministerio de Agricultura de Estados Unidos, 2013).

⁴ Proceso mediante el cual un disolvente líquido (ej. agua de riego) permite la disolución de elementos solubles en un sólido pulverizado o poroso (ej. tierra de cultivo).

Gráfico 1. Evolución de emisiones agrícolas por fuente, 2000 – 2016



FUENTE: Elaboración propia con datos de MINAGRI (2000, 2005, 2010, 2012, 2016)

II.1.2 Capturas de Carbono

La captura o reducción de carbono en las actividades agrícolas se da a través de la fotosíntesis y la fijación de nitrógeno en el suelo. Los cultivos permanentes y la reducción del movimiento de tierra permiten que estos gases queden retenidos en el suelo. Existen diferentes técnicas para reducir las emisiones de carbono descritas en la sección anterior, tales como: aumento de la materia orgánica del suelo, labranza cero, abono verde, manejo de residuos de cultivos, reducción del uso de fertilizantes, prevención de la compactación del suelo, extensión de la fase perenne de rotaciones de cultivos y labranza de conservación. El potencial de captura de carbono depende del área de la tierra, así como de las prácticas que se adoptan (FAO 2018a).

II.2 Compromiso Nacional de Mitigación

El compromiso nacional de mitigación se da en el marco del Acuerdo de París ratificado por el Perú en 2016, mismo año que entró en vigor a nivel mundial. El Acuerdo es jurídicamente vinculante para la reducción de los GEI durante el periodo 2020-2030. Ha sido ratificado por 186 países y busca mantener el incremento de la temperatura por debajo de 2°C (Frank *et al.* 2018). El Acuerdo de París se caracteriza por el principio de ambición, el cual establece que los países deberán aumentar paulatinamente sus esfuerzos a través de la renovación de las NDC cada 5 años.

La actividad agrícola es de gran importancia en el Perú, pues 2.3 millones de personas viven de ella (ENA 2017). El sector agropecuario en el Perú, contribuye con el 15% del total de emisiones a nivel nacional, siendo el tercer sector con más altas emisiones reportadas, luego de los sectores de energía y bosques (MINAM 2016a). Las emisiones del sector agrícola suelen presentarse de manera conjunta con

el pecuario, como se observa en la Tabla 2, donde incluso se puede ver que la fuente de emisión “suelos agrícolas” presenta contribuciones tanto agrícolas como pecuarias.

Tabla 2. Fuentes de emisión agrícolas y pecuarias y su representatividad en sector agropecuario

SECTOR	FUENTES DE EMISIÓN	%	SUBTOTALES
PECUARIO	Fermentación entérica (directa)	39%	73%
PECUARIO	Manejo de estiércol (directa)	6%	
PECUARIO	Suelos agrícolas – estiércol (directa)	1%	
PECUARIO	Suelos agrícolas – estiércol (indirecta)	13%	
PECUARIO	Suelos agrícolas - pastoreo animal (indirecta)	14%	
AGRÍCOLA	Suelos agrícolas – fertilizantes (directa e indirecta)	11%	27%
AGRÍCOLA	Suelos agrícolas – fijadores (directa)	5%	
AGRÍCOLA	Suelos agrícolas - residuos de cosecha (directa)	2%	
AGRÍCOLA	Arrozales anegados (directa)	5%	
AGRÍCOLA	Quema de sabanas (directa)	2%	
AGRÍCOLA	Quema de residuos (directa)	2%	
SECTOR AGROPECUARIO		100%	100%

Fuente: Elaboración propia con datos del MINAGRI (2014)

Tabla 3. Fuentes de emisión agrícolas y su representatividad en sector

FUENTES DE EMISIÓN	%
Suelos agrícolas – fertilizantes (directa e indirecta)	41%
Suelos agrícolas – fijadores (directa)	18%
Suelos agrícolas - residuos de cosecha (directa)	9%
Arrozales anegados (directa)	20%
Quema de sabanas (directa)	6%
Quema de residuos (directa)	6%
SECTOR AGRÍCOLA	100%

Fuente: Elaboración propia con datos del MINAGRI (2014)

En la Tabla 3 se presentan la participación de cada fuente de emisión únicamente del sector agrícola. Sin embargo, hay que considerar que las fuentes de emisión de quema de residuos y suelos agrícolas, tienen como contribuyentes a todos los cultivos, incluido el arroz. Esto significa que, por ejemplo, el total de emisiones del arroz es la suma de “arroz anegado” más una fracción del volumen que se encuentra inmerso en las demás fuentes. En otras palabras, con la estructura actual del inventario de GEI, no se puede identificar la responsabilidad de cada cultivo, únicamente las contribuciones por fuente de emisión de manera agregada. De todos modos, se estima que el cultivo con más contribución de emisiones es el arroz, lo cual explica la relevancia que tiene el cultivo en el compromiso nacional.

El compromiso nacional de mitigación plantea una reducción de emisiones relativa a una línea base *Business as Usual* (BAU) la cual tiene como año base el 2010 y corte en 2030. El compromiso propone una reducción del 20% de las emisiones que será implementada a través de recursos públicos y privados. Contempla la ambición de reducir 10% de GEI adicional, supeditado a la disponibilidad del financiamiento externo internacional (MINAM 2016a). Esto significa que la meta de reducción planteada reduce mínimo 20% y máximo 30% de GEI, dependiendo del acceso a recursos externos. Los compromisos nacionales verificables de mitigación en el sector agrícola son (MINAGRI 2018):

- (1) Reconversión de cultivos de arroz por otros cultivos: Contempla hectáreas de arroz convertidas a otros cultivos y se espera una reducción de emisiones acumulada de 0.3 MtCO₂e al 2030. El alcance geográfico de la medida comprendería la costa norte, la cual concentra el 36% de la producción nacional de arroz.
- (2) Sistema de seca intermitente en cultivos de arroz: Aplicando la técnica de riego de secas intermitentes, las emisiones de metano por inundación de arrozales disminuirían significativamente. Como resultado de implementarse la medida al año 2030, se obtendría un acumulado de 1.7 MtCO₂e reducidas. Las actividades relacionadas a esta medida se desarrollarían en costa norte y selva, donde se concentran el 58% de la superficie cultivada de arroz a nivel nacional.

Cabe mencionar que el Acuerdo de París señala que se deberán establecer mecanismos que permitan a los países aumentar su ambición y cumplir con sus compromisos, tales como los mecanismos de mercado. No obstante, para evitar reajustes del escenario, el compromiso del Perú no ha considerado mecanismos de mercado existentes o nuevos para su cumplimiento (NDC MINAM).

Para que estos compromisos se implementen se requieren mecanismos de mercado que las hagan rentables desde corto plazo y puedan mantenerse a largo plazo para el productor. Estos mecanismos dependen a su vez de las condiciones habilitantes que existan en el país. Según el Informe Final de Compromisos Nacionales (MINAM, 2018), estas condiciones habilitantes pueden clasificarse en cuatro tipos: servicios financieros, no financieros, procedimientos administrativos y, monitoreo. Se considera relevante, complementar esta clasificación con una tipología adicional de infraestructura, como se explican en la Tabla 4.

Tabla 4. Clasificación de condiciones habilitantes para medidas de mitigación

Clasificación	Descripción
Servicios no financieros	Consiste en la formación de capacidades y difusión de nuevas tecnologías. También incluye procesos de sensibilización y participación ciudadana.
Servicios financieros	Incluye creación de subvenciones, pago por servicios ecosistémicos u otros productos financieros.
Procedimientos administrativos	Generar arreglos institucionales y mecanismos de coordinación interinstitucional que permitan la implementación y progreso de los mecanismos.
Monitoreo y seguimiento	Consiste en mejorar la generación y gestión de datos de emisiones, tanto en calidad como en periodicidad.
Infraestructura	Contempla el incremento de las rutas de acceso a los productores para que tengan mayor conectividad y posibilidad de ingresar a nuevos mercados.

Fuente: elaboración propia con información del MINAM (2018)

II.3 Mecanismos de mitigación del cambio climático

En Estados Unidos, la agricultura es responsable de aproximadamente el 8,7% de las emisiones. La fuente más importante es suelos agrícolas, la cual incluye emisiones de todos los cultivos. Se proyecta que, de no hacer nada al respecto, las emisiones agrícolas aumentarán entre 3 y 9% por encima de los niveles de 2005 para 2050 (Huber 2018). Las oportunidades para reducir las emisiones agrícolas se concentran en reducir los insumos de fertilizantes nitrogenados. Además, la gestión mejorada del suelo puede aumentar el secuestro de carbono en los suelos agrícolas.

En China, las emisiones de GEI agrícolas han aumentado en los últimos 25 años, representando el 20% de las emisiones totales del país, principalmente por la fuente de emisión suelo agrícola, proveniente de fertilizantes nitrogenados (Chen, S. *et al.*2014)⁵. El estudio de Chen *et. al* (2014) resume que hay al menos dos tipos de medidas sugeridas hasta ahora para mitigar las emisiones de los fertilizantes. Una es mejorar el tiempo y la colocación de los fertilizantes de nitrógeno sintéticos y la gestión integrada de nutrientes, que es una de las medidas más efectivas de reducción de emisiones con costos negativos de entre US \$30 y US \$60, gracias al ahorro de costos de producción generado. El otro es mediante el empleo de fertilizantes de liberación lenta e inhibidores de la nitrificación, que son solo un 5-10% más caros que los convencionales, pero pueden reducir las emisiones de N a la mitad (Chen, S. *et al.*2014).

En países en desarrollo, las tendencias muestran un aumento de las emisiones de gases en el sur y el sudeste de Asia, América Latina y el África subsahariana, con el mayor aumento por la fuente de emisión suelo agrícola (Schletz, *et al.* 2017). El 68% de los países No Anexo I que han presentado sus contribuciones nacionales, incluyen al sector agrícola como parte de sus contribuciones nacionales. Esta cifra se reduce a 52% cuando se observa los países de la región Asia-Pacífico, y asciende a 81% en África subsahariana (Schletz, *et al.* 2017). Tanto Asia del Sur como Europa del Este y Asia Central,

⁵ Mayor información en Anexo 1. “Incentivos perversos de fertilizantes chinos”

apuestan por la adopción de mejores prácticas de manejo de suelo, agua, nutrientes y tecnologías para reducir las emisiones de GEI de la agricultura (Aryal *et al.* 2019).

En la región de Latinoamérica y El Caribe, son tres las medidas que se han identificado con un mayor potencial para reducir las emisiones agrícolas. En primer lugar, la agricultura orgánica (a través de la sustitución de fertilizantes sintéticos en sus operaciones), seguida de la agricultura sin aeración del suelo o labranza cero, y finalmente la aplicación de fertilizantes de liberación controlada (FLC, por sus siglas en inglés) (Vergara *et al.* 2015)⁶.

Según el estudio “Rice Landscape and Climate Change” (FAO, 2018b), se están implementando una serie de tecnologías y prácticas para tratar de abordar las emisiones de la producción de arroz, que incluyen:

- Cultivos de rotación: los cuales pueden reducir la emisión de metano del campo de arroz en un 40 a 45%, aunque esta práctica suele incrementar las emisiones de nitrato.
- Drenaje múltiple: reduce las emisiones de metano en aproximadamente un 49%, aunque las emisiones de nitrato suelen incrementar con este método.
- Aplicación de biochar⁷: puede reducir emisiones de metano en un 10-60% según el tipo de suelo.
- Humedecimiento y secado alternado (AWD por sus siglas en inglés): técnica ampliamente aceptada como una de las prácticas más prometedoras para reducir las emisiones de metano en un 40% en promedio.

⁶ Mayor información en Anexo 2. “Oportunidades de reducción de emisiones agrícolas en LAC”

⁷ Biochar o biocarbono: subproducto de la pirólisis de la biomasa característico por su alto contenido de carbono (Biederman, 2013).

Capítulo III: Metodología

Para el objetivo de esta investigación se ha construido un modelo de equilibrio parcial, conocido como POLYSYS⁸ (De La Torre Ugarte y Ray, 2000), tomando como año base el 2016 e incorporando alternativas de mitigación al modelo para alcanzar el compromiso nacional al 2030, las cuales serán explicadas más adelante. Por tanto, el efecto de las alternativas de mitigación se observará en el desplazamiento que éstas ocasionen en la proyección base. A continuación, se describe los componentes del modelo.

III.1 Estructura del Modelo

El modelo se estructura en 14 categorías de productos agrícolas. Para agruparlos se ha considerado sus características biológicas, comerciales, y las de sus emisiones de GEI, como se describe en la Tabla 5. Cabe mencionar que, dado que las emisiones generadas por la que de sabanas no están asociadas a la producción de ningún cultivo en particular si no a las características del ecosistema, sin pérdida de generalidad, dicha fuente de emisión está siendo excluida en este modelo considerando que solo representa el 4% de las emisiones agrícolas.

Asimismo, se ha organizado el territorio nacional en siete dominios. Los dominios se basan en las características geográficas del Perú, ya que las decisiones de producción de una determinada categoría de cultivos dependen de las características ambientales y la capacidad del suelo para producirlo, por lo que es un criterio de clasificación relevante. Los dominios se muestran en el Gráfico 2 y se delimitan a nivel de provincia, en concordancia con la clasificación de la Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA).

La función de oferta se deriva a partir de la asignación de la tierra cultivable en cada dominio, entre los usos alternativos que se presentan en cada dominio. Esta asignación de la tierra cultivada por dominio se obtiene optimizando beneficios totales que se pueden obtener de la utilización de la tierra cultivada, $\Pi_{i,t,r}$, que se definen como los ingresos menos los costos de cada categoría en cada periodo, $C_{i,t,r}$. Los ingresos están dados por los precios nacionales, $P_{i,t}$ (S./ kg), multiplicado por el rendimiento nacional, $Y_{i,t}$ (kg/ha), y por tierra cultivada en cada dominio, $L_{i,t,r}$ (ha), siendo esta última la variable de decisión. Los costos comunes para todas las categorías incluyen costos de abono, fertilizantes, semillas, pesticidas y mano de obra. Esta optimización se repite para cada dominio.

$$\text{Max } \Pi_{i,t,r}$$

$$\Pi_{i,t,r} = P_{i,t}Y_{i,t}L_{i,t,r} - C_{i,t,r}L_{i,t,r}$$

⁸ El POLYSYS se puede conceptualizar como una variante de un modelo de desplazamiento de equilibrio (EDM) y fue desarrollado en Estados Unidos para simular cambios en la política económica y la gestión agrícola, para estimar los impactos resultantes de estos cambios en el sector. (De La Torre y Ray, 2000)

$$C_{i,t,r} = c_{i,t,r}^{abono} + c_{i,t,r}^{fertilizantes} + c_{i,t,r}^{pesticidas} + c_{i,t,r}^{semillas} + c_{i,t,r}^{mano\ de\ obra}$$

Donde:

i: categoría de cultivo, $i = 1, 2, 3 \dots, N$ con $N=14$

t: periodo de tiempo, $t = 0, 1, 2 \dots T_i$

r: dominios del modelo, $r = 1, 2, 3 \dots R$ con $R = 7$

El agente optimizador es el agricultor y para decidir toma en cuenta sus expectativas para los periodos siguientes. En ese sentido, la función a optimizar debe considerar los beneficios futuros traídos a valor presente con el factor de descuento, δ . Además, algunas categorías de cultivo pertenecen a cultivos permanentes ($i = 1, 2, 3$), es decir que el terreno no producirá de manera rentable desde el periodo de decisión, como para el caso de los cultivos transitorios ($3 < i \leq 14$). Para la producción rentable de cultivos permanentes, deben pasar tantos años como sean necesarios para que la planta crezca lo suficiente para que su producción sea rentable. Con el objetivo de simplificar el modelo, esta cantidad de años será la misma para todas las categorías permanentes e igual a 2. Para reflejar esto en la función de maximización, se agregan costos de inversión inicial, $I_{i,0}$, los cuales tendrán un valor diferente de cero para las categorías de cultivos permanentes, e igual a cero para cultivos transitorios. Esta tipología de categorías se puede observar en la Tabla 5.

$$\text{Max } \Pi_{i,t,r} \quad \Pi_{i,t,r} = \sum_{t=0}^{T_i} \delta^t (P_{i,t} Y_{i,t} L_{i,t,r} - C_{i,t,r} L_{i,t,r}) - I_{i,0,r} L_{i,0,r}$$

Donde:

T_i : periodo de tiempos con producción rentable según categoría, con

$$T_i = \begin{cases} T - 2, & \text{para } 0 \leq i \leq 3 \\ T, & \text{para } 3 < i \leq 14 \end{cases}$$

$T=14$ para proyección del 2017 al 2030

Se ha definido una restricción por cada categoría de cultivo, la cual enmarca la decisión de tierra cultivada a un límite inferior, a_i , y superior, b_i , ambos menores a uno, con el objetivo de suavizar los cambios de un periodo a otro y evitar que se decida cultivar únicamente la categoría más rentable del periodo anterior, lo cual sería poco realista. Con propósitos de simplificación, estos límites son los mismos a nivel nacional para cada categoría. La última restricción permite que la suma de tierras cultivadas de todas las categorías sea menor o igual al total de tierras aptas para cultivo disponibles en el dominio, $\overline{L_{t,r}}$. En total hay 15 restricciones por cada dominio. En total, se maximizan $N \times R$ funciones de beneficio. Si bien la disponibilidad y acceso al agua también es una restricción en la decisión del productor, se ha excluido la restricción por los limitados datos disponibles para estructurarla por dominio y categoría.

$$a_i L_{i,t-1,r} \leq L_{i,t,r} \leq b_i L_{i,t-1,r}$$

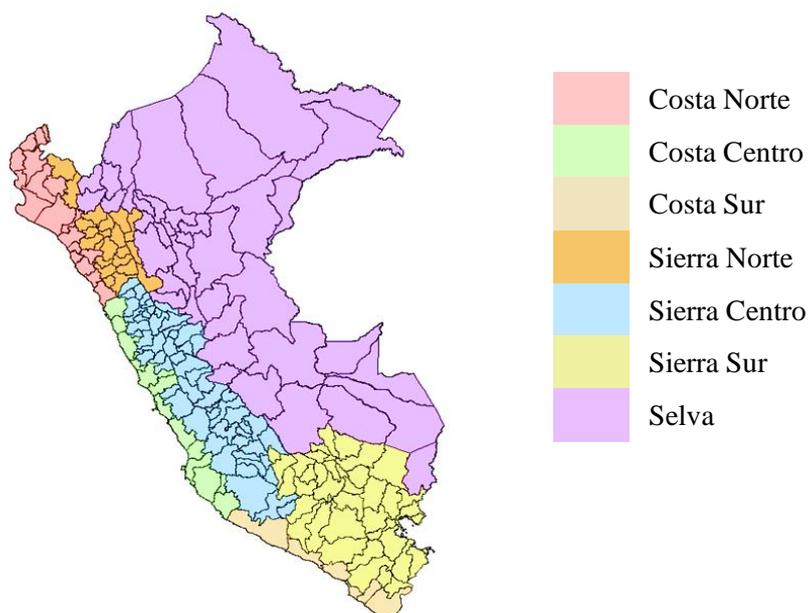
$$\sum L_{i,t,r} \leq \overline{L_{t,r}}$$

Tabla 5. Categorías de productos agrícolas ordenadas

i	Categorías	Producto agrícola	Tipo de Producción*	Mercado*	Fuentes de Emisión**
1	Frutas de exportación	Arándanos, plátanos, mango, mandarina, palta, uva	Permanente	Exportación	Fertilizantes, residuos de cosecha, quema de residuos
2	Frutas nacionales	Papaya, piña, granadilla, maracuyá, durazno, naranja	Permanente	Consumo nacional	Fertilizantes, residuos de cosecha, quema de residuos
3	C&C	Café y cacao	Permanente	Consumo nacional y exportación	Fertilizantes, residuos de cosecha, quema de residuos
4	Arroz	Arroz	Transitoria	Consumo nacional e importación	Fertilizantes, residuos de cosecha, quema de residuos, arroz
5	Algodón	Algodón	Transitoria	Consumo nacional y exportación	Fertilizantes, residuos de cosecha, quema de residuos
6	Cereales	Cebada, Quinoa, Soya, Trigo	Transitoria	Consumo nacional	Fertilizantes, residuos de cosecha, quema de residuos
7	Tubérculos	Papa y camote	Transitoria	Consumo nacional	Fertilizantes, residuos de cosecha, quema de residuos
8	Maíz	Maíz choclo, maíz amiláceo y maíz chala	Transitoria	Consumo nacional	Fertilizantes, residuos de cosecha, quema de residuos
9	Maíz amarillo duro	Maíz amarillo duro	Transitoria	Consumo nacional e importación	Fertilizantes, residuos de cosecha, quema de residuos
10	Legumbres	Lentejas, arvejas, frijol, haba	Transitoria	Consumo nacional	Fertilizantes, residuos de cosecha, quema de residuos, fijadores de N
11	Verduras de exportación	Espárrago, alcachofa	Transitoria	Exportación	Fertilizantes, residuos de cosecha, quema de residuos
12	Verduras nacionales	Cebolla, tomate	Transitoria	Consumo nacional	Fertilizantes, residuos de cosecha, quema de residuos
13	Caña de azúcar	Caña de azúcar	Transitoria	Consumo nacional	Fertilizantes, residuos de cosecha, quema de residuos
14	Pastos	Alfalfa	Transitoria	Consumo nacional	Fertilizantes, residuos de cosecha, quema de residuos

(*) Fuente: Elaboración propia a partir de datos del MINAGRI (2017). (**) Fuente: IPCC (2014)

Gráfico 2. Dominios del modelo



Fuente: Elaboración propia.

Para la proyección de GEI, $G_{i,t}$, se tienen factores, $F_{i,f}$, por categoría y fuente de emisión, los cuales se multiplican por las tierras cultivadas según categoría de cultivo. Cada fuente de emisión genera un tipo de GEI particular por lo que, para el total de GEI por categoría de cultivo, las emisiones fueron convertidas a la unidad de medida común por convención, CO₂ equivalente o CO_{2e}, la cual se calcula en función del potencial de calentamiento, PC_x , de cada tipo de GEI, los cuales son factores predefinidos por el IPCC (2014).

$$G_{i,t,r} = \sum_{f=1}^F \sum_{x=1}^X G_{f,x,i,t,r} PC_x \quad (1)$$

$$G_{f,x,i,t,r} = F_{i,f} L_{i,t,r} \quad (2)$$

Donde:

- i: categoría de cultivos
- t: periodo de tiempo en años
- f: fuente de emisión
- r: dominios del modelo
- x: tipo de GEI

Si reemplazamos (2) en (1), tenemos la ecuación simplificada (3) que será la que se utiliza para obtener los resultados de emisiones.

$$G_{i,t,r} = K_i L_{i,t,r} \quad (3)$$

Donde:

$$K_i = \sum_{f=1}^F \sum_{x=1}^X F_{i,f} PC_x$$

En cuanto a la función de demanda, esta se define a nivel nacional. El modelo incluye una ecuación de demanda, $Q^d_{i,t}$, para cada categoría de cultivo, la cual está dada por su demanda en el periodo anterior más el efecto del cambio en precio, ΔP_i , por las elasticidades precio cruzadas, E_i , como se muestra en la ecuación (4). Con esto se construye un sistema de ecuaciones perfectamente identificado para hallar el cambio en la demanda en cada categoría, ΔQ^d_i . Del mismo modo, bajo el supuesto de limpieza de mercado, $Q^d_{i,t} = Q^s_{i,t}$, tenemos que la cantidad demandada es igual a la ofertada, lo cual nos permite hacer el vínculo con lo encontrado con la función de oferta y hallar el cambio de precios de cada categoría, ΔP_i .

$$Q^d_{k,t} = Q^d_{1,t-1} (1 + \sum_{i \neq k}^N E_i \Delta P_i) \quad (4)$$

Donde k : categoría diferente a i

Dado que las tres categorías permanentes generan retornos luego de 2 años, durante ese periodo de tiempo, la superficie, $L_{i,t,r}$, de esta categoría deberá mantenerse constante. Por ello, en total se resuelven

$(N - i) \times R$, para $0 \leq i \leq 3$, ecuaciones de demanda por el método Gauss – Seidel para resolver sistema de ecuaciones simultáneas.

La lógica de las proyecciones se basa en la maximización de la oferta antes descrita para llegar a una solución de $L_{i,t}$ que permita el equilibrio.

$$Q^d_{i,t} = Q^s_{i,t} = Y_{i,t}L_{i,t}$$

La solución es proyectada para el año siguiente de acuerdo a las fuerzas de crecimiento. Las fuerzas de crecimiento incorporadas al modelo son crecimiento poblacional, mejora de rendimientos de categoría de cultivos, y cambio en PBI. Esto se repiten año a año por 14 veces, desde el año base 2016 hasta el año 2030, como se ilustra en el Gráfico 3.

Gráfico 3. Dinamización del modelo agrícola



Fuente: elaboración propia

Como herramienta operativa para el análisis de datos de la ENA se utilizó SPSS, para la construcción del modelo se utilizó Matlab el cual jala los datos desde hojas de cálculo de Excel.

III.2 Datos y supuestos

El precio de cada categoría está dado a nivel nacional y se obtuvo ponderando los precios nacionales de cada producto agrícola que compone la categoría, según su valor de producción (S/. / ha). Los datos de precios nacionales y valores de producción fueron obtenidos de las Series Estadísticas de Producción Agrícola (SEPA) del Ministerio de Agricultura (MINAGRI), la cual cuenta con datos históricos (1950 – 2017), utilizando como año base el 2016. Los precios obtenidos pueden verse en el Anexo 3.

Para hallar el rendimiento por categoría y dominio, se dividió el ingreso por hectárea de cada categoría y dominio entre el precio nacional de cada categoría previamente hallado. Los resultados se encuentran en el Anexo 4.

La tierra cultivada por dominio se obtuvo calculando las proporciones de superficie que cada región tiene en un dominio (por ejemplo: 20% de la región Piura se encuentra en el dominio de sierra norte y el 80% se encuentra en el dominio costa norte) según la Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA) del 2016, ya que viene estructurada con los mismos dominios del modelo. Se usaron estas proporciones para ponderar los datos de la SEPA por cultivo y por región. Finalmente, se agregaron los resultados por dominio. Los datos de tierra cultivada por categoría y dominio se encuentran en el Anexo 5.

Los límites mínimos, a_i , y máximos, b_i , para las decisiones de tierras cultivadas por categoría, se obtuvieron con un promedio simple de los cambios históricos (6 años) en la tierra cultivada, lo cual se obtuvo de la SEPA. Los resultados de a_i y b_i por categoría se encuentran en el Anexo 6.

Los costos por categoría y dominio, se obtuvieron ponderando los datos de costos de la ENA con la tierra cultivada ajustada con el factor de expansión. Las elasticidades precio cruzadas a utilizar en las ecuaciones de demanda interna fueron proporcionadas por el estudio del INEI (1994) siendo el estudio más completo y actual de este tipo. Dado que las elasticidades fueron dadas en rangos y por productos de consumo, se tuvo que calibrar para que resuelvan las ecuaciones del modelo y se necesitó el uso de proxys para las categorías de cultivo.

Los factores de emisión por producto agrícola fueron obtenidos directamente del Reporte Anual de GEI (RAGEI) del Ministerio de Agricultura el cual, a su vez, se basa en la guía del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC). Se profundizó en la metodología de las emisiones por cultivo para reorganizar las emisiones del sector, ya no por fuente de emisión si no por cultivo y así observar más claramente la contribución de emisiones de cada uno a nivel nacional. A continuación, para obtener los factores por categoría se realizó una ponderación simple, utilizando el nivel de emisión correspondiente a cada fuente de emisión, según lo descrito anteriormente en la Tabla 5. Los factores de emisión resultantes ponderados por categoría se encuentran en el Anexo 7. El potencial de calentamiento global de cada gas se obtuvo del IPCC, siendo $PC_{CH_4} = 23$, para el metano y $PC_{NO_x} = 310,4$, para el nitrato. Cabe mencionar que el destino de los fertilizantes nitrogenados por cultivo, fueron dados por juicio de expertos de la empresa Yara Perú. Estos valores se encuentran en el Anexo 8.

La población proyectada está dada por los datos del Proyecto T21-Perú, quienes a su vez calibraron los datos obtenidos del INEI. La mejora de rendimientos de cultivos por dominio, está dada por el

rendimiento del dominio con mejor rendimiento del país. El cambio en PBI también ha sido obtenido del modelo construido en el Proyecto T21-Perú (PAGE, 2017).

Las alternativas de mitigación buscan castigar la producción del cultivo del arroz por ser el cultivo con mayor participación en la generación de emisiones agrícolas, como se vio anteriormente. Como se mencionó en el planteamiento de la hipótesis de esta investigación, se espera que estas alternativas propicien la reconversión de los cultivos de arroz por cultivos alternativos. Las características de las alternativas se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Alternativas de mitigación

Alternativa	Objetivo
---	Proyección Base: Escenario de referencia. Es útil como línea base para identificar el impacto de las alternativas de mitigación a evaluar.
Costos	Incrementar costos de producción de categorías de cultivos con mayor participación en la generación de emisiones agrícolas para desalentar su expansión.
Precios	Incrementar los precios de venta de categorías de cultivos con menor participación en la generación de emisiones agrícolas para hacerlas más atractivas y fomentar su crecimiento.
Costos y Precios	Integrar las alternativas de Costos y Precios para observar el efecto agregado.

Fuente: Elaboración propia

III.3 Limitaciones

Entre las principales limitaciones del modelo, se consideran: El modelo no está considerando shocks climáticos, tales como el Fenómeno del Niño, o periodos de sequía. Asimismo, no han sido consideradas restricciones de agua de cada región. Además, el modelo no incorpora las condiciones sociales del país, las cuales son complejas y asimétricas a lo largo del Perú, tales como conflictos sociales, infraestructura de mercado pre-existente, entre otros.

Capítulo IV: Análisis de resultados

IV.1 Proyección Base

Como primer resultado importante, se observa en el Gráfico 4 el desglose de las emisiones del sector agrícola por categoría de cultivo, considerando todas las fuentes de emisión del sector. En este gráfico se puede observar que el cultivo con la mayor representatividad de emisiones en el 2016, es el arroz con más del 40% del total. El siguiente cultivo con la mayor responsabilidad en las emisiones del sector es la alfalfa con más del 16%. Nótese que, entre el primer y el segundo cultivo con mayor responsabilidad en la generación de emisiones, hay una diferencia mayor a 25%. Los cultivos que siguen en representatividad de emisiones son las Frutas de Exportación y el Maíz Amarillo Duro con 6.9% y 5.08%, respectivamente. Estas cuatro categorías de cultivos representan 70.5% de las emisiones agrícolas del año 2016. Cabe mencionar que, si bien la responsabilidad de emisiones que recae sobre estas categorías de cultivo también está relacionada con su gran extensión territorial, no es lo único que lo define. Como se puede observar también en el Gráfico 4, la categoría con la mayor extensión es el Café y Cacao con 17.47% de la superficie cultivada, seguida de Tubérculos con el 14.54%, aunque ciertamente la diferencia que existe entre estos dos cultivos es menor al 3%. En términos de superficie cultivada, encontramos la categoría de Arroz recién como tercero de la lista con el 14.38% y a la Alfalfa en el puesto nueve con 5.5%, luego de Cereales y Granos, Maíz Amarillo Duro, Frutas de Exportación, y Maíz, categorías que representan cada una con cerca del 9% de la superficie cultivada en el 2016.

En el Gráfico 5 se observa que las emisiones se concentran en los dominios Selva y Costa Norte, por lo que serán los dominios priorizados en los análisis siguientes. Las emisiones alcanzan los 5 521.79 Gg de CO₂e en el 2030, lo cual significa que para alcanzar el 13% de mitigación definido en el compromiso nacional, las emisiones deberán llegar a 4 831.6 Gg de CO₂e en el 2030, como se señala con la línea roja en el Gráfico 5.

En el Gráfico 6 se presentan los cambios en la superficie cultivada cada 5 años en cada dominio priorizado para las principales categorías de cultivos. Se puede interpretar como una tasa de expansión cuando es mayor a cero o una tasa de contracción territorial cuando es menor a cero. Para el caso de la Costa Norte, se observa que el Arroz sigue una tendencia a contraerse, mientras que las Frutas y Vegetales de exportación, así como la Caña de azúcar siguen una tendencia expansiva. Por otro lado, en la Selva se repite la tendencia del Arroz, sin embargo, los cultivos con tendencia a expandirse son principalmente el Café y Cacao, así como las Frutas de Consumo Nacional. Por su parte, los Tubérculos y las Frutas de Exportación siguen una tendencia a contraerse. La superficie de Tubérculos se contrae en menos intensidad que la del Arroz y la superficie de las Frutas de Exportación se contraen en mayor grado que el Arroz.

Gráfico 4. Representatividad en emisiones vs superficie cultivada por categoría de cultivo, 2016 (%)

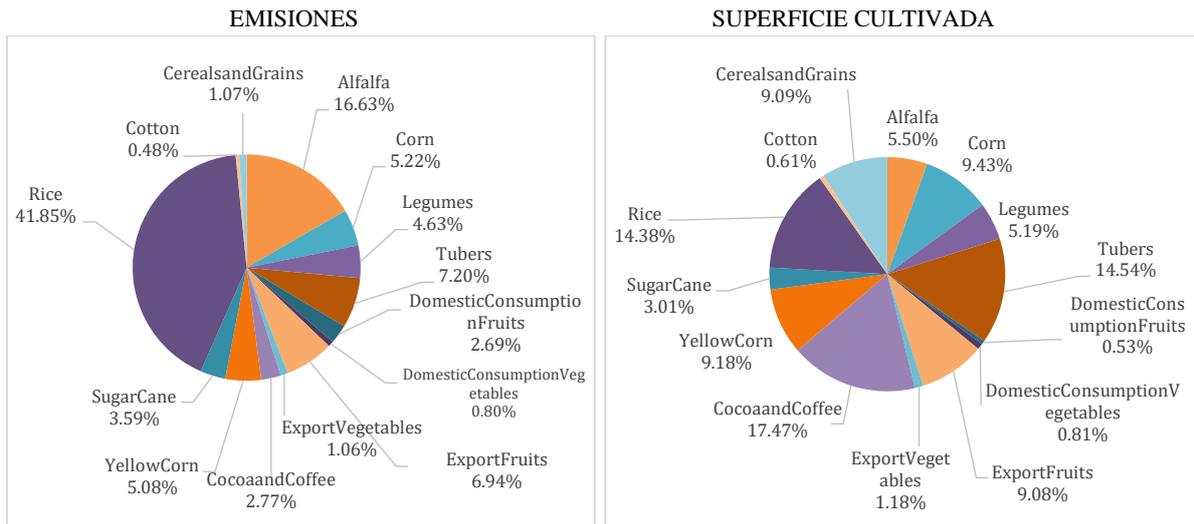


Gráfico 5. Emisiones de carbono agrícola por dominios, 2016-2030 (Gg de CO₂e)

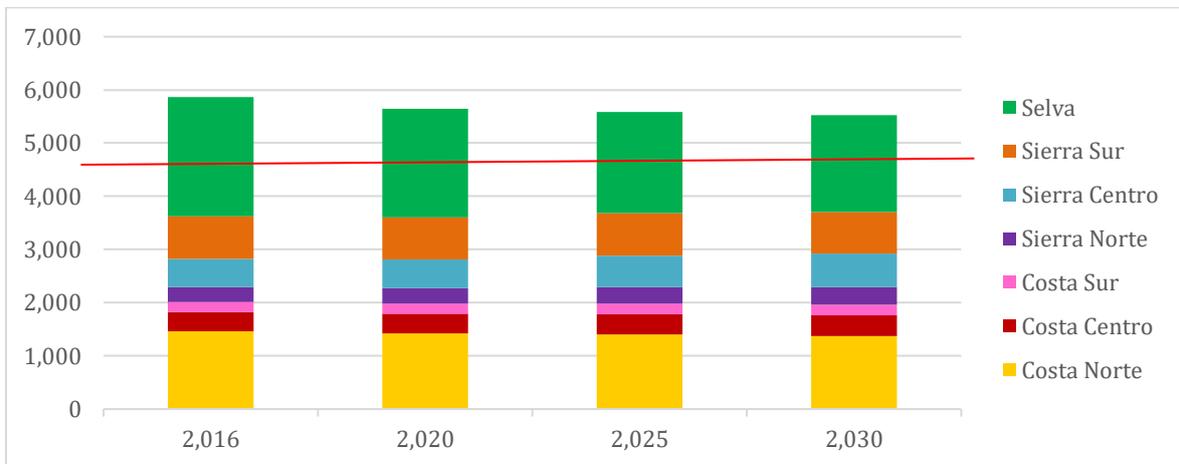
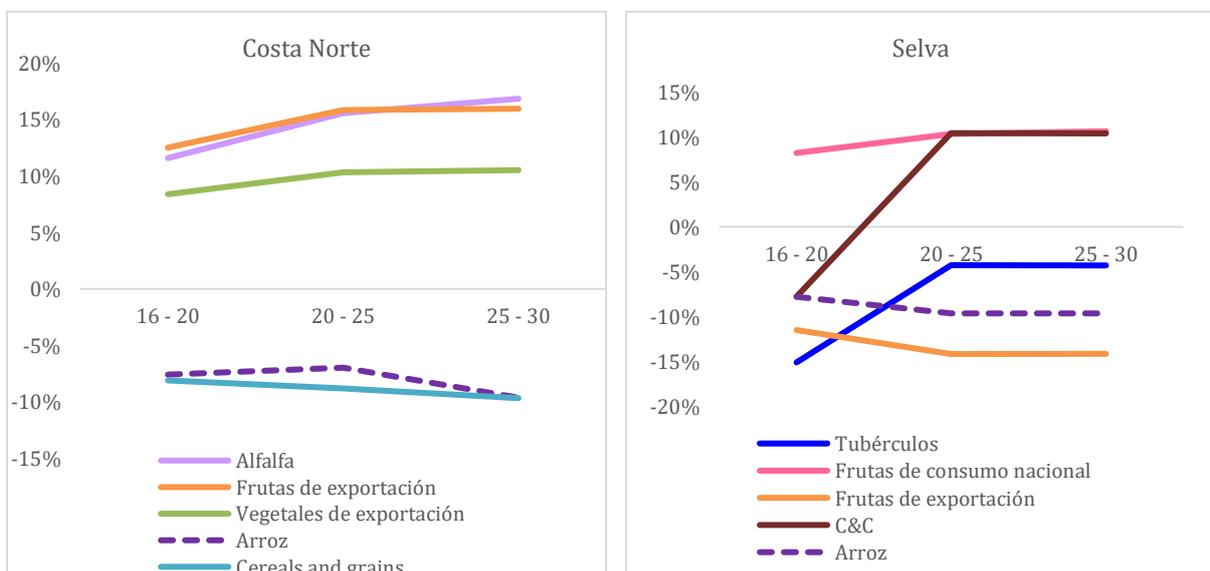


Gráfico 6. Cambio de superficie cultivada en dominios priorizados, 2016-2030 (%)



IV.2 Alternativa de Costos

Como primera alternativa para la reducción de emisiones en el periodo 2016-2030, se evalúa el incremento de costos de los cultivos con mayor participación en la generación de emisiones del sector agrícola, principalmente del Arroz, aunque también de la Alfalfa. Para lograr este incremento en costos se utilizan mecanismos de mercado que influyen en los factores de producción de ambos productos. Como se explicó en el capítulo III, los factores de producción considerados en el modelo son: semillas, abono, fertilizantes, pesticidas y mano de obra.

Al analizar la estructura de costos⁹ del Arroz, se observa que entre el 60% y 70% de estos vienen dados por la adquisición de fertilizantes y la mano de obra. Para el caso de la Alfalfa, se observa que cerca del 90% de sus costos vienen dados por la mano de obra. En este sentido, los mecanismos de mercado apuntan a incrementar los precios de estos dos factores productivos: fertilizantes y mano de obra.

Al incrementar el costo de mano de obra, si bien se obtiene el incremento buscado en los costos de producción de Alfalfa y Arroz, también se generaría un incremento de costos no deseado en otras categorías de cultivos, tales como Frutas de Exportación, Cereales y Granos, Café y Cacao, Legumbres y Maíz. Por ello, el mecanismo está limitado para cultivos forrajeros, de modo que repercute principalmente en los costos de la Alfalfa. El mecanismo utilizado para incrementar el costo en mano de obra acotado a cultivos forrajeros, como la Alfalfa, se justifica porque este tipo de cultivos se caracterizan por no requerir de mano de obra permanente en el predio si no contratarse por periodos de tiempo de 2 a 3 meses cada 2 o 3 años por hectárea. Esto se debe a que los pastos se regeneran de manera natural luego del pastoreo animal y solo son vueltos a sembrar cuando han sido degradados, lo cual ocurre usualmente en un periodo de tiempo de 2 a 3 años. En este sentido, el precio de la mano de obra dedicada a este cultivo puede verse favorecido, mecanismo que puede verse enmarcado en la Ley de Promoción Agraria N° 27360 la cual tiene entre una de sus modificaciones del 2019 un incremento del 150% en la remuneración básica diaria de la mano de obra agrícola (MINAGRI, 2019).

El incremento de costos de fertilizantes se logra con la eliminación de la exoneración del IGV vigente actualmente (SUNAT, 2007). Al aumentar el costo de fertilizantes, se obtiene el incremento buscado en los costos de producción de Arroz. Sin embargo, dado que este factor de producción también es relevante para otras categorías de cultivos, tales como Frutas de Consumo Nacional, Tubérculos, Vegetales, Maíz Amarillo Duro y en cierto grado para el Maíz y el Algodón, el mecanismo ha sido limitado para productos de consumo humano y nacional. De esta forma, el mecanismo excluye a

⁹ La participación de los factores de producción en la estructura de costos de las categorías de cultivo puede encontrarse en el Anexo 9.

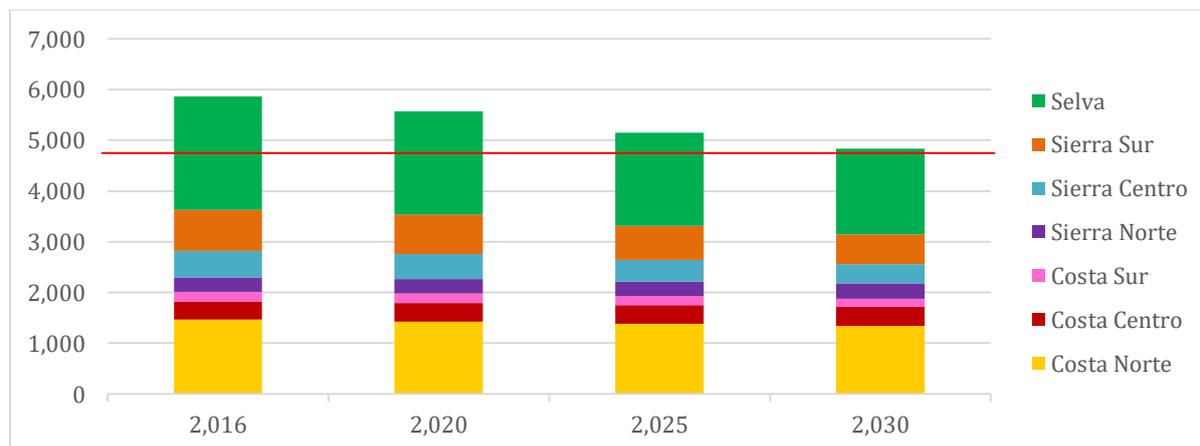
categorías como Frutas y Vegetales de Exportación, Algodón y Maíz Amarillo Duro, repercutiendo principalmente en el Arroz, pero también en Frutas de Consumo Nacional, Tubérculos y Maíz.

Para alcanzar una reducción significativa de gases de efecto invernadero con esta alternativa, los mecanismos fueron aplicados con una intensidad de 50%, obteniéndose un incremento en costos de 50% tanto para el Arroz como para la Alfalfa. Se obtuvo además un incremento en costos de 25% en Tubérculos y Frutas de Consumo Nacional, y del 15% en los costos de Maíz. En términos de emisiones, se logró reducir en 12% las emisiones previstas al año 2030, según la proyección base descrita en la sección IV.1, alcanzando los 4 834.41 Gg de CO₂e. Si bien este resultado está muy cerca de la meta nacional, aún es insuficiente para cumplirla, ya que la reducción comprometida es del 13% de emisiones.

Tabla 7. Resumen de la Alternativa de Costos

ALTERNATIVA	INCREMENTO DE COSTOS
MECANISMOS	Incremento en costo de mano de obra de cultivos forrajeros Incremento en costo de fertilizantes nitrogenados para cultivos de consumo humano y nacional
INTENSIDAD DE MECANISMOS	50% para ambos mecanismos
REPERCUSIÓN EN CULTIVOS	<ul style="list-style-type: none"> • 50% más en costo de producción de arroz • 50% más en costo de producción de alfalfa • 25% más en costo de producción de frutas de consumo nacional • 25% más en costo de producción de tubérculos • 15% más en costo de producción de maíz
RESULTADO	12% de reducción de emisiones al 2030 respecto a proyección base.

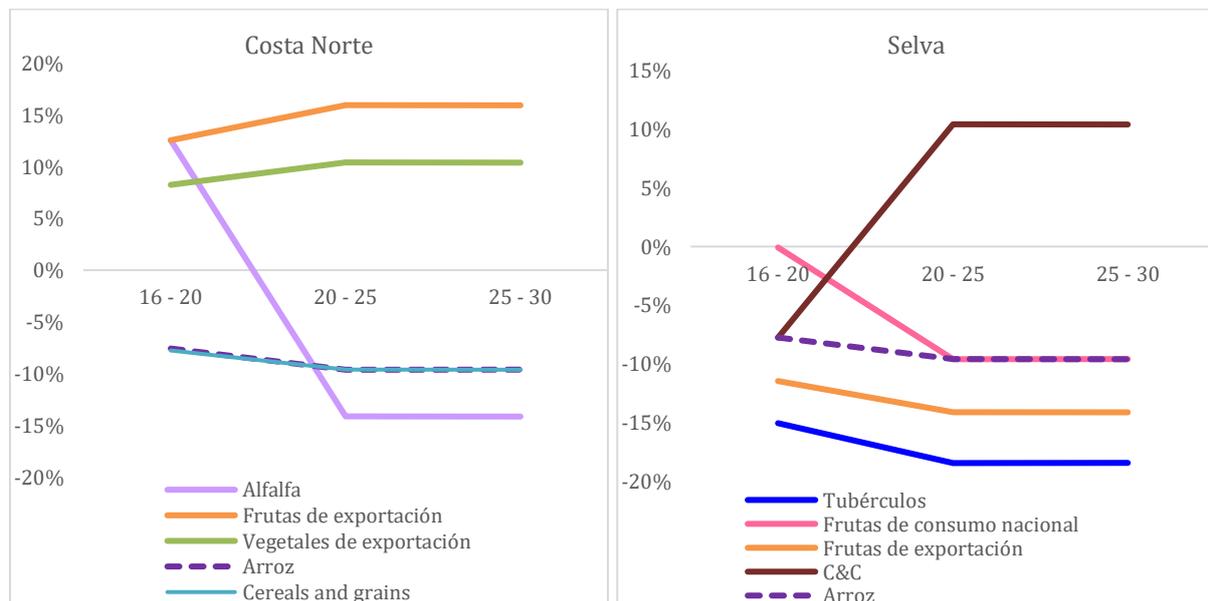
Gráfico 7. Emisiones de carbono agrícola por dominios bajo Alternativa de Costos, 2016-2030 (Gg de CO₂e)



A nivel de dominios, en Costa Norte se observa una ligera expansión de la caña de azúcar y contracción territorial del Arroz y la Alfalfa, sin cambios significativos en Frutas y Vegetales de Exportación. Cabe resaltar que, a pesar que la presente Alternativa ha repercutido en los costos de ambos cultivos en la misma intensidad (+50%), el efecto en la superficie cultivada ha sido bastante diferenciado. Se puede observar que esta alternativa ha permitido intensificar ligeramente la reducción de la superficie cultivada de Arroz en la Costa Norte, aportando a su vez en la reducción de emisiones a nivel nacional. Mientras que para el cultivo de Alfalfa se observa reducción dramática en la superficie cultivada.

En el dominio Selva, se mantiene el ritmo de expansión del Café y Cacao, mientras que hay una notable contracción territorial de las Frutas de Consumo Nacional y Tubérculos. Por su parte, el Arroz y las Frutas de Exportación no sufren cambios significativos en su tasa de expansión respecto a la Proyección Base. Este cambio significativo en el dominio Selva para las Frutas y Tubérculos a diferencia del Arroz, se puede explicar por la alta dependencia al consumo de Arroz que se presenta en la dieta cotidiana a nivel nacional.

Gráfico 8. Cambio de superficie cultivada en dominios priorizados bajo Alternativa de Costos, 2016-2030 (%)



En los Anexos 10 y 11 se puede ver la evolución anualizada de las emisiones y la superficie cultivada de las principales categorías de cultivos para los dominios priorizados.

IV.3 Alternativa de Precios

La siguiente alternativa busca incrementar los precios de comercialización de los cultivos con menor participación en la generación de emisiones agrícolas por unidad de superficie cultivada. Las categorías de cultivo correspondientes son Café y Cacao; y Granos y Cereales.

Para lograr el incremento en precios se ha contemplado utilizar, en primer lugar, un mecanismo de mercado que permita incrementar el valor percibido de los productos. Esto puede lograrse a través de información persuasiva provista, por ejemplo, con certificados socio-ambientales como FAIR TRADE y SELLO ORGÁNICO, con Marca País – Perú u otras campañas de comunicación masiva. Las particularidades sociales y ambientales de los productos que componen la canasta de las categorías de Café y Cacao, y Granos y Cereales, son una oportunidad para persuadir a los clientes a incrementar su disposición a pagar, de modo que puedan aceptar un incremento en el precio. Las certificaciones socio-ambientales tienen la posibilidad de incrementar los precios de los productos hasta en S/. 2.60 por kilogramo (FairTrade, 2017).

Otra forma de ofrecer información persuasiva es a través de la Marca Perú, resaltando los diferenciales de la producción nacional de ambas categorías de cultivo. En el 2019, la Marca Perú ha incrementado su valor en 59% y se ubica como la segunda marca mejor valorada de América Latina (Future Brand, 2019), lo cual refleja una oportunidad para fortalecer la competitividad de los productos analizados.

Para complementar, el incremento de precios puede darse de manera atenuada, ya sea mediante segmentación de clientes o por un incremento progresivo. Al segmentar los clientes se pueden ofrecer precios diferenciados, según su disponibilidad a pagar. Por ejemplo, al segmento x se le ofrece el producto con precios incrementados, mientras que al segmento x' se le aplica luego de un año u otro periodo de tiempo. De la misma forma, el precio puede incrementar paulatinamente de manera anual o bianual, de modo que no se perciba como un cambio repentino o difícil de asumir.

Se utiliza una intensidad amplia para la aplicación de estos mecanismos para poder obtener un efecto significativo en la reducción de emisiones, por lo que se está obteniendo precios de Café y Cacao 50% más elevados y 30% más elevados para el caso de Granos y Cereales. En términos de emisiones, se alcanzan los 5 320.16 Gg de CO₂e, lo cual se traduce como una reducción del 3% de las emisiones previstas para el 2030 según la proyección base descrita en la sección IV.1. Si comparamos estos resultados con los obtenidos bajo la Alternativa de Costos, vemos que la Alternativa de Precios ha tenido un efecto menor.

Al observar el comportamiento de la superficie cultivada en cada dominio, se observa en el Gráfico 10 que en Costa Norte hay un salto en la expansión territorial de la categoría de Granos y Cereales, motivada por los incrementos en el precio. Las demás categorías presentan cambios poco significativos. Por su parte, el dominio Selva presenta los principales cambios en las categorías de Café y Cacao y de Tubérculos. A diferencia de los resultados de la Proyección Base, la expansión territorial de los cultivos de Café y Cacao es mayor o igual a cero en todos los periodos de tiempo. En el caso de los Tubérculos, su contracción territorial se debilita de manera más progresiva que en lo obtenido en la Proyección Base.

En los Anexos 10 y 11 se puede ver la evolución anualizada de las emisiones y la superficie cultivada de las principales categorías de cultivos para los dominios priorizados.

Gráfico 9. Emisiones de carbono agrícola por dominios bajo Alternativa de Precios, 2016-2030 (Gg de CO₂e)

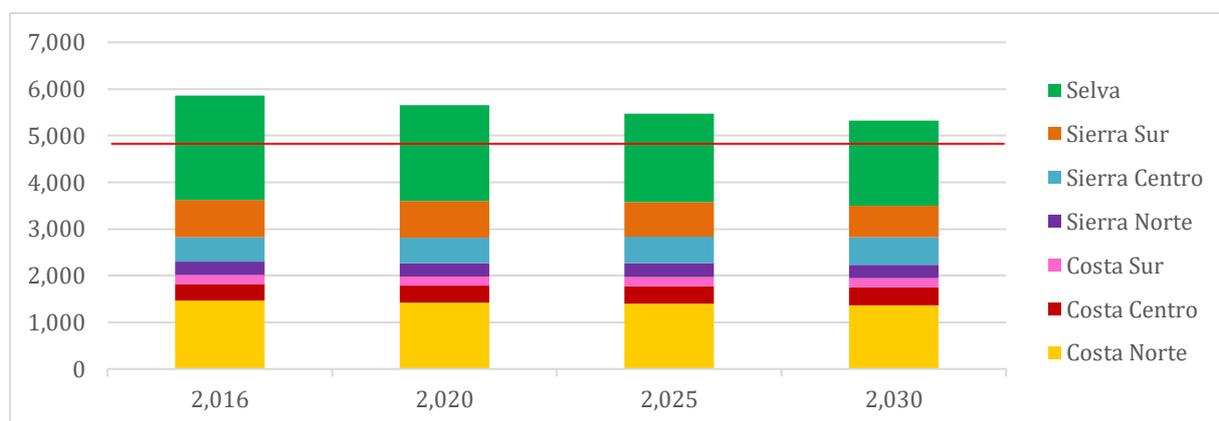


Gráfico 10. Cambio de superficie cultivada en dominios priorizados bajo Alternativa de Precios, 2016-2030

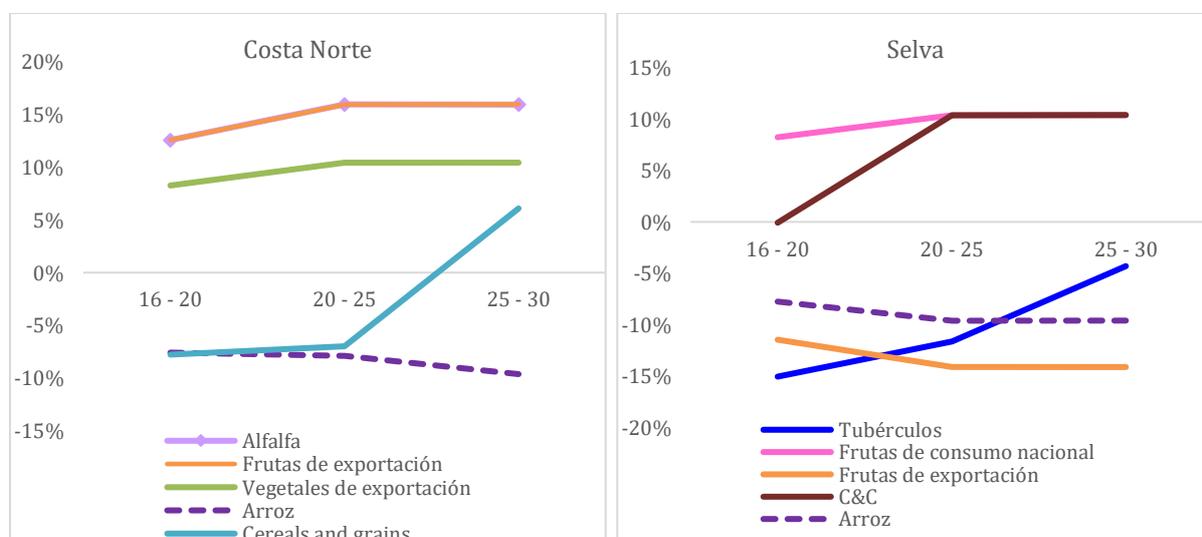


Tabla 8. Resumen de la Alternativa de Precios

ALTERNATIVA	INCREMENTO DE PRECIOS
MECANISMOS	Incremento del valor percibido a través de información persuasiva Incremento en precios por segmento de clientes y progresivo en el tiempo.
INTENSIDAD DE MECANISMOS	50% para Café y Cacao 30% para Cereales y Granos
REPERCUSIÓN EN CULTIVOS	<ul style="list-style-type: none"> • 50% más en precio de Café y Cacao • 30% más en precio de Cereales y Granos
RESULTADO	3% de reducción de emisiones al 2030 respecto a proyección base.

IV.4 Alternativa de Costos y Precios

Esta Alternativa consiste en integrar las planteadas anteriormente de manera conjunta. Para ello se aplican los mecanismos descritos en la sección IV.2 y IV.3 con las mismas intensidades, como se presentan en la Tabla 9.

Los resultados obtenidos alcanzan 4 831.2 Gg de CO₂e logrando así alcanzar la reducción del 13% de emisiones establecida por la meta nacional de mitigación para este sector. Es importante destacar que el 13% de reducción de emisiones a nivel nacional se ha logrado aplicando los mecanismos mencionados en todos los dominios, lo que significa que en las demás regiones del país también ha habido cambios en emisiones y superficies cultivadas. De todos modos, los dominios priorizados de Costa Norte y Selva contienen el 5% y 16% de la reducción lograda, respectivamente.

Al observar el comportamiento en los dominios priorizados en el Gráfico 12, se observa una expansión de la categoría de Cereales y Granos y una contracción del cultivo de Alfalfa en Costa Norte. Si bien la tendencia decreciente del Arroz se intensifica ligeramente, el cambio es poco significativo. Esto se explica nuevamente por la gran dependencia de los hábitos de consumo a este cultivo y a la poca elasticidad que caracteriza al sector agrícola.

El cambio más notorio en el dominio Selva corresponde a la caída de la superficie cultivada de Frutas de Consumo Nacional, que pasa de tener una tasa de expansión de alrededor de 10% a ser igual o menor a cero en todo el periodo de tiempo analizado. Otro resultado que salta a la vista es intensificación de la tendencia a contraerse de la categoría de Tubérculos. Asimismo, se observa que, a diferencia de la Proyección Base, la categoría de Café y Cacao mantiene una tendencia igual a mayor a cero desde el primer periodo de tiempo. En los Anexos 10 y 11 se puede ver la evolución anualizada de las emisiones y la superficie cultivada de las principales categorías de cultivos para los dominios priorizados.

Gráfico 11. Emisiones de carbono agrícola por dominios bajo alternativa de Costos y Precios, 2016-2030 (Gg de CO₂e)

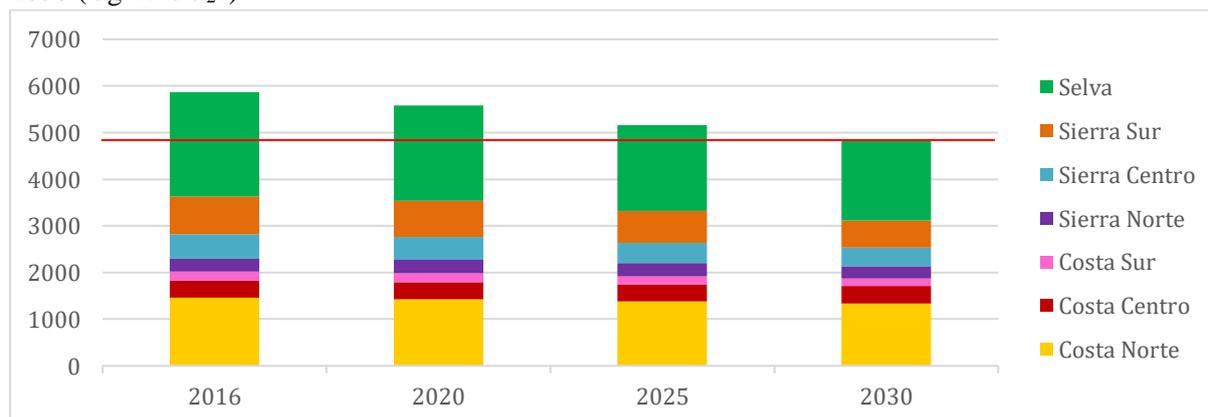


Gráfico 12. Cambio en superficie cultivada en dominios priorizados bajo Alternativa de Costos y Precios, 2016-2030

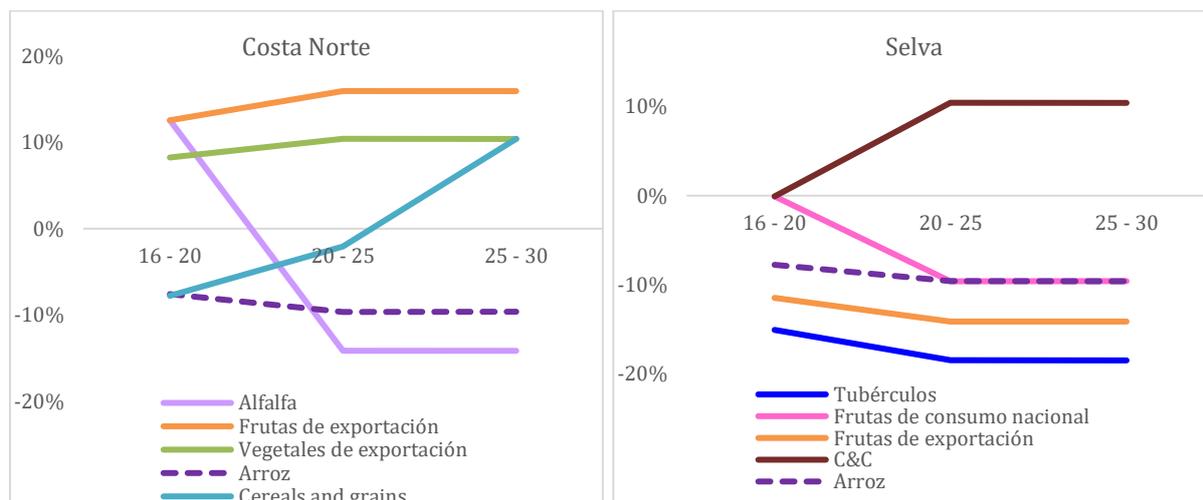


Tabla 9. Resumen de la Alternativa de Costos y Precios

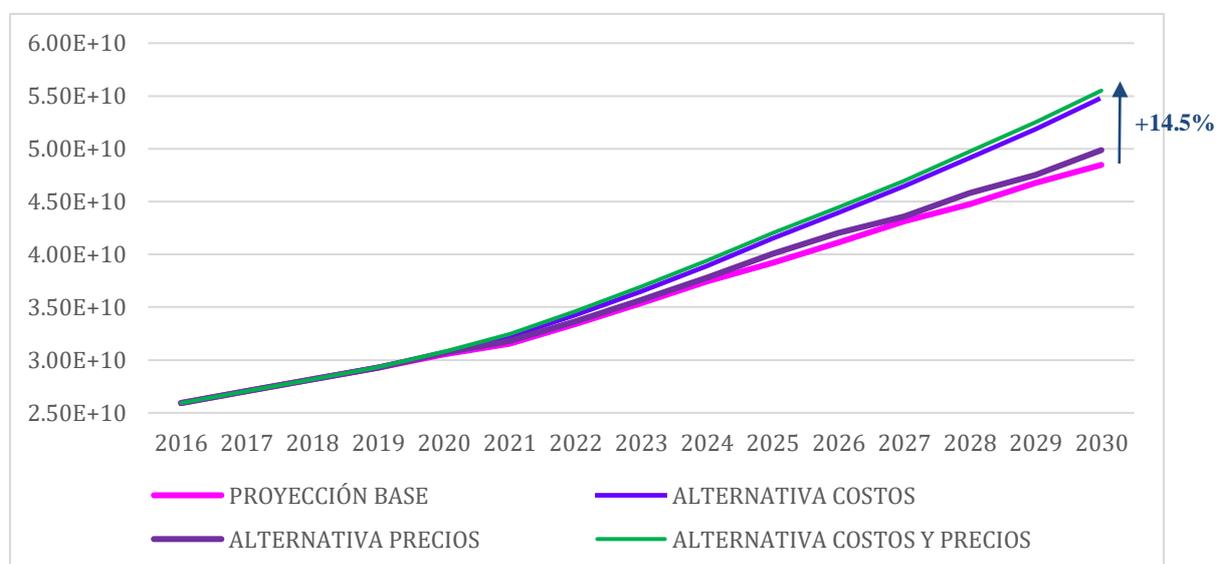
ALTERNATIVA	INCREMENTO DE COSTOS Y PRECIOS
MECANISMOS	a. Incremento en costo de mano de obra de cultivos forrajeros b. Incremento en costo de fertilizantes nitrogenados para cultivos de consumo humano y nacional c. Incremento del valor percibido a través de información persuasiva d. Incremento en precios por segmento de clientes y progresivo en el tiempo
INTENSIDAD DE MECANISMOS	50% para a. 50% para b. 50% para c y d con Café y Cacao 30% para c y d con Cereales y Granos
REPERCUSIÓN EN CULTIVOS	<ul style="list-style-type: none"> • 50% más en costo de producción de arroz • 25% más en costo de producción de frutas • 25% más en costo de producción de tubérculos • 15% más en costo de producción de maíz • 50% más en costo de producción de alfalfa • 50% más en precio de café y cacao • 30% más en precio de granos y cereales
RESULTADO	13% de reducción de emisiones al 2030 respecto a proyección base.

IV.5 Análisis Comparativo

En el Gráfico 13 se observa el Valor de Producción del sector agrícola bajo la Proyección Base y las tres alternativas de mitigación aplicadas en esta investigación. Se observa que los mecanismos implementados incrementan el Valor de Producción del sector en diferentes magnitudes, directamente proporcional a las emisiones que reducen. Es así que bajo la Alternativa de Costos el Valor de Producción se incrementa en 13% respecto al estimado en la Proyección Base para el 2030. Bajo la Alternativa de Precios, el incremento es de 2.9% y bajo la Alternativa de Costos y Precios, el incremento es de 14.5%. En este último caso, el Valor e Producción pasa de 48,5 mil millones de soles a 55,5 mil millones de soles, es decir hay un incremento de 7 millones de soles.

Estos resultados evidencian que las Alternativas de mitigación planteadas no perjudican el crecimiento económico del sector. No obstante, hay que resaltar que estos valores no contemplan la inversión pública que acarrea la implementación y mantenimiento de los mecanismos propuestos.

Gráfico 13. Valor de producción agrícola bajo Alternativas de mitigación, 2016 – 2030 (soles)



En la Tabla 10 se puede observar en qué medida se contrae o expande la superficie cultivada según categoría de cultivo en comparación a la superficie cultivada esperada para el 2030 en la Proyección Base. Bajo la Alternativa de Costos, los cultivos con contracción superficial son Frutas de Consumo Nacional y Alfalfa (-31% cada uno), Tubérculos (-25%), y Maíz (-24%). Los cultivos con mayor expansión son Algodón (+29%), Cereales y Granos (+27%), Maíz Amarillo Duro (+14%) y Legumbres (+13%). Algo que llama la atención es la ligera expansión del Arroz (+5%) a pesar de haber incluido 50% de costos adicionales. Cabe mencionar que es la única categoría de cultivos que ha sido afectada por los mecanismos de incremento de costos que presenta una expansión en el territorio. Bajo la Alternativa de Precios, se observa una contracción en la superficie de todas las categorías de cultivo con excepción de los cultivos beneficiados por los mecanismos de incremento de precios

implementados, Café y Cacao (+8%) y Cereales y Granos (+47%). Por otro lado, bajo la Alternativa de Costos y Precios se contrae la superficie de las mismas categorías de cultivos que en el caso de la Alternativa de Costos, aunque con un efecto de contracción más amplio. En el caso del Arroz, nuevamente se observa su expansión territorial, aunque de manera más suavizada (+1%). La categoría de Cereales y Granos incrementa su superficie en 56%, seguida por el Algodón (+20%) y Café y Cacao (+14%).

Estos resultados muestran que reducir la producción de Arroz es un desafío que no se logra aun incrementando sus costos en 50%. Esto puede explicarse nuevamente por la alta dependencia de la dieta nacional en el Arroz y su poca elasticidad, que lo hace un cultivo bien posicionado y arraigado entre los productores. La reducción de la producción del Arroz sí puede lograrse dando mayores incentivos a la comercialización de otros cultivos que los haga más atractivos para los productores, como muestran los resultados de la Alternativa de Precios. En este sentido, se puede decir que para reducir las emisiones del sector se deben castigar a varios de los cultivos con mayor intensidad de carbono, como la Alfalfa, Tubérculos, Maíz, y no únicamente al Arroz. Con medidas que aborden a todos los cultivos emisores de manera integral, se puede lograr una reducción de las emisiones del sector incluso si la superficie cultivada de Arroz incrementa.

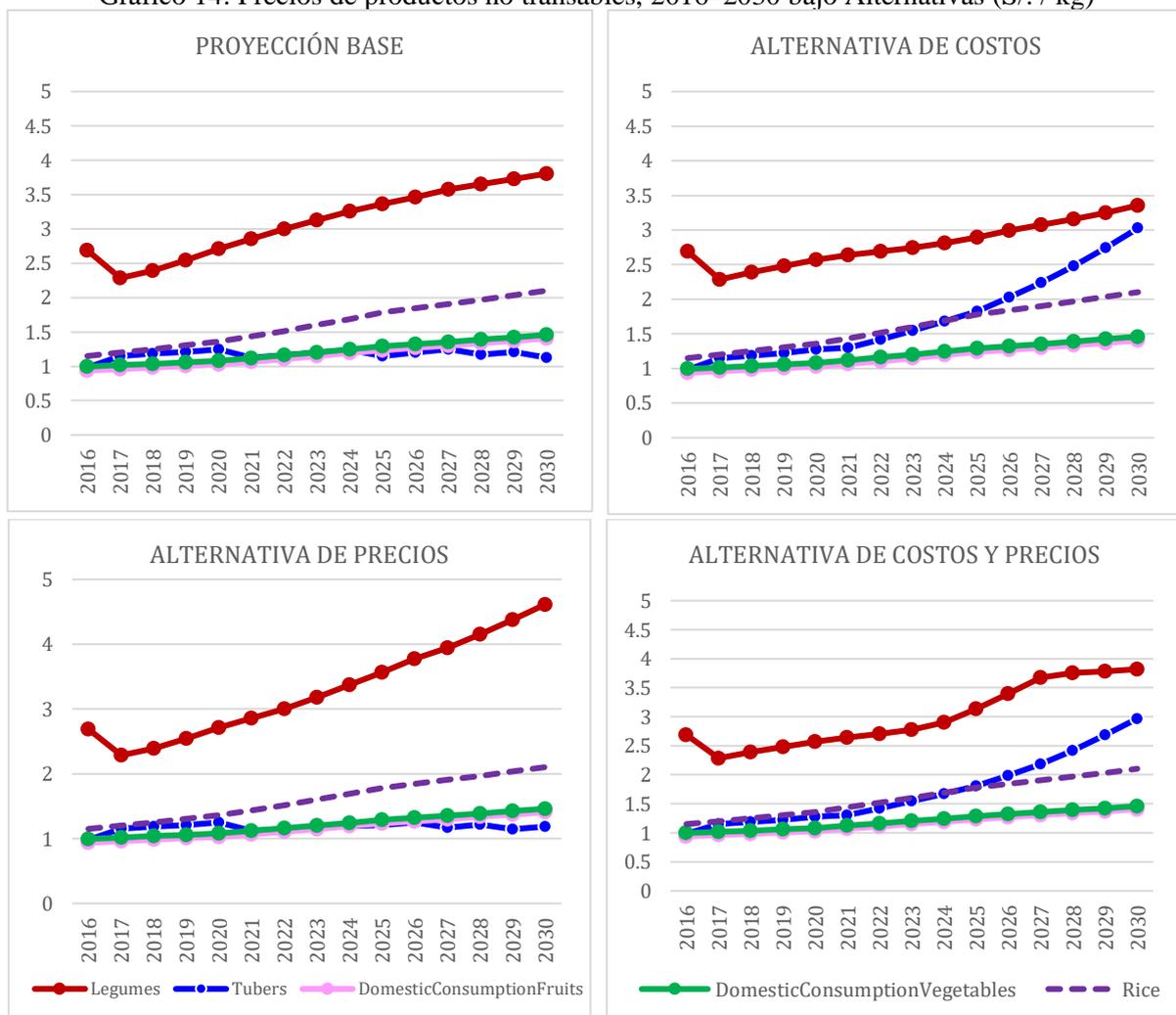
Tabla 10. Cambios en superficie cultivada nacional con respecto a Proyección Base en el 2030

CATEGORÍA	ALTERNATIVA COSTOS	ALTERNATIVA PRECIOS	ALTERNATIVA COSTOS Y PRECIOS
Alfalfa	-31%	-11%	-33%
Maíz	-24%	-22%	-28%
Legumbres	13%	-12%	-1%
Tubérculos	-25%	-6%	-28%
Frutas nacionales	-31%	-1%	-34%
Vegetales nacionales	8%	-1%	4%
Frutas de exportación	8%	-1%	4%
Vegetales de exportación	9%	-1%	5%
C&C	9%	8%	14%
MAD	14%	-8%	8%
Azúcar	10%	-2%	5%
Arroz	5%	-2%	1%
Algodón	29%	-2%	20%
Cereales y Granos	27%	47%	56%

El Gráfico 14 muestra la dinámica de precios de las categorías de cultivos considerados como no transables en el modelo: Legumbres, Tubérculos, Frutas y Vegetales de Consumo Nacional y Arroz. Se puede observar que los precios de las Frutas y Vegetales de Consumo Nacional y el Arroz no sufren cambios significativos bajo ningún escenario, lo cual señala el grado de rigidez en precios de estos cultivos. Mientras tanto, el precio de los Tubérculos incrementa bajo todas las Alternativas, en particular

bajo la Alternativa de Costos donde sufre un incremento de S/.1.90 por kilogramo, y de manera más suavizada bajo la Alternativa de Costos y Precios en la que incrementa en S/.1.80. Bajo la Alternativa de Precio el incremento del precio es poco significativo (S/.0.05). Esto se puede explicar por la reducción de la superficie cultivada (-25%) observada en la Tabla 10. Considerando que los tubérculos son ingredientes con mucha presencia en la gastronomía nacional y en los hábitos de consumo de la ciudadanía, se entiende por qué la reducción en la superficie cultivada incrementa los precios significativamente de esta categoría de cultivos a diferencia de, por ejemplo, Frutas de Consumo Nacional la cual también presenta una reducción en la superficie cultivada pero el precio se mantiene sin cambios.

Gráfico 14. Precios de productos no transables, 2016–2030 bajo Alternativas (S/. / kg)

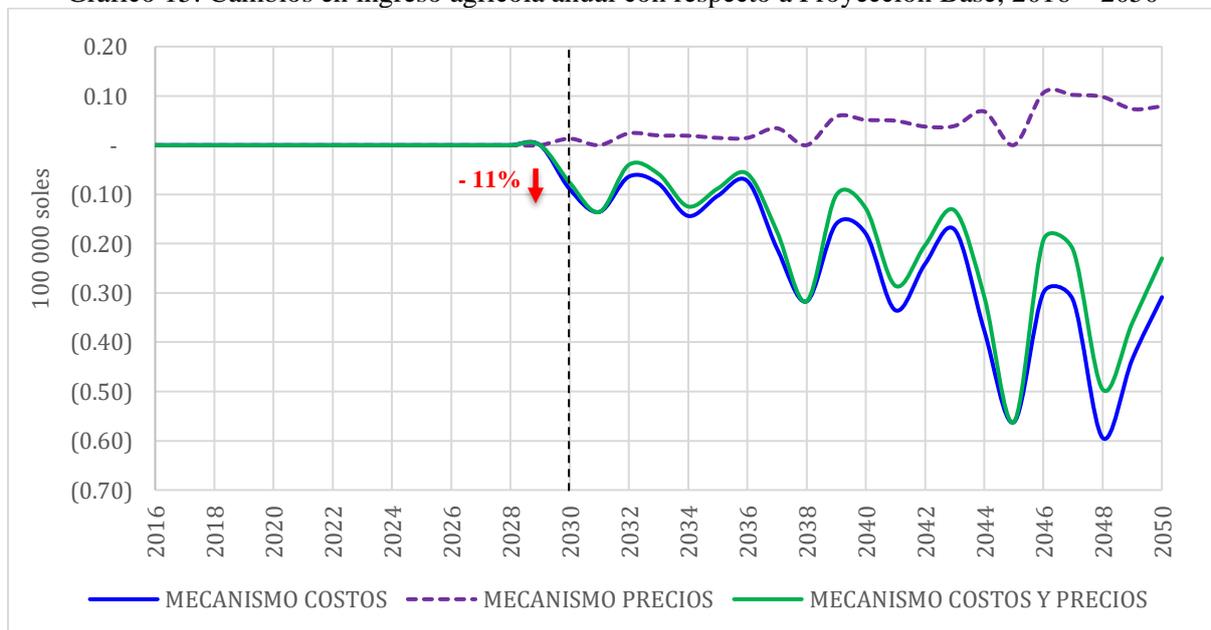


Por su parte, el precio de Legumbres disminuye ligeramente bajo la Alternativa de Costos e incrementa significativamente en la Alternativa de Precios, incrementando S/.0.80 por kilogramo en el 2030 respecto a la Proyección Base. Bajo la Alternativa de Costos y Precios el precio de las Legumbres se mantiene igual en el año 2030 pero siguen otra trayectoria respecto a la Proyección Base, disminuyendo

ligeramente entre los años 2019 al 2026 e incrementando en el 2026 al 2029 para regresar al mismo precio de la Proyección Base en el 2030.

En el Gráfico 15 se observa la dinámica del ingreso agrícola anual bajo las Alternativas. Se puede observar que las curvas de todas las Alternativas siguen la misma tendencia que la Proyección Base hasta el 2029. En el año 2030 las curvas de ingresos se desacoplan y este desacoplo se va amplificando con el paso de los años. La diferencia del ingreso al 2030, entre la Proyección Base y la Alternativa de Costos y Precios que es la que alcanza la meta de reducción de emisiones, se puede interpretar como el costo de cumplimiento del compromiso. Esta diferencia es de S/. 7 615.30 anual lo cual representa -11% respecto a la Proyección Base. Por su parte, la Alternativa de Costos tiene este mismo efecto ligeramente más amplificado (-13%). Cabe mencionar que la Alternativa de Precios es la única que genera un aumento en el ingreso agrícola en el 2030, el cual equivale a S/. 1 314.80 más que en la Proyección Base, lo que significa un ingreso 1.9% mayor. Esto se explica porque esta Alternativa se centra en incrementar los precios y no afectar directamente los costos de producción, a diferencia de las otras dos Alternativas.

Gráfico 15. Cambios en ingreso agrícola anual con respecto a Proyección Base, 2016 – 2050



Conclusiones y sugerencias

El modelo desarrollado evidencia que, para reducir la cantidad de emisiones necesaria para cumplir con el compromiso nacional de mitigación en el sector agrícola, es suficiente implementar mecanismos que permitan de manera conjunta (i) incrementar los costos productivos del cultivo de arroz en 50%, e (ii) incrementar entre 30% y 50% los precios de Cereales y Granos y Café y Cacao, respectivamente.

El marco teórico de este documento muestra la relevancia de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel nacional, en el marco del compromiso del país por gestionar el cambio climático ratificado con el Acuerdo de París en el 2016. En ese sentido, esta investigación ha permitido la construcción de un modelo capaz de priorizar las zonas y los cultivos del país en los cuales enfocar el mayor esfuerzo y los recursos del Estado para lograr el cumplimiento del compromiso. El modelo se basa en un problema de programación lineal con módulos de oferta y demanda nacional e internacional de todos los cultivos del país agregados en 14 categorías.

Según los resultados, el cultivo de arroz representa el 41.9% del total de las emisiones del sector agrícola y los dominios a priorizar para mitigarlas son la Costa Norte y la Selva debido a su mayor participación en la generación de emisiones a nivel nacional.

La investigación explora mecanismos de mercado que permiten alcanzar tres alternativas de mitigación analizadas. Si bien el compromiso nacional vigente no contempla la implementación de mecanismos de mercado, el Acuerdo de París los recomienda como una opción para el logro de los objetivos.

La primera Alternativa de mitigación analizada, consistió en incrementar los costos de producción del Arroz y la Alfalfa en 50% a través del incremento en 50% de los costos de mano de obra de cultivos forrajeros y de fertilizantes nitrogenados para cultivos de consumo humano y nacional. Esta alternativa redujo en 12% las emisiones al 2030 con respecto a la Proyección Base. La segunda Alternativa incrementó los precios de cultivos con bajas emisiones relativas a su superficie cultivada. Se incrementó en 50% el precio del Café y Cacao y en 30% de Granos y Cereales, a través de una adecuada información persuasiva mediante certificaciones socio-ambientales bajo una estrategia segmentada y progresiva. Esta Alternativa logró reducir las emisiones en 3%. Finalmente, la tercera Alternativa, de Costos y Precios, integra lo implementado en las dos primeras, lo cual alcanzó la reducción del 13% buscada para el cumplimiento del compromiso nacional para este sector.

Como resultado del modelo, también se obtuvo que el valor de producción del sector agrícola no se ve perjudicado bajo las alternativas implementadas. El mayor incremento del Valor de Producción se da bajo la Alternativa de Costos y Precios, alcanzando un 14.5% más que el resultado obtenido en la

Proyección Base para el año 2030, lo cual equivale a más de 7 millones de soles. Estos resultados evidencian que las Alternativas de mitigación planteadas no perjudican el crecimiento económico del sector. No obstante, hay que resaltar que estos valores no contemplan la inversión pública que acarrea la implementación y mantenimiento de los mecanismos propuestos.

En términos de superficie cultivada, la Alternativa de Costos y Precios presenta un incremento de 56% en la superficie de Cereales y Granos, de 20% del Algodón y de 14% del Café y Cacao. Cabe mencionar que la categoría de Arroz sufre un ligero incremento de 1%. Las categorías que sufren mayor contracción territorial son Frutas de Consumo Nacional (-34%), Alfalfa (-33%), Maíz (-28%), Tubérculos (-28%) y Legumbres (-1%). Se concluye que se puede lograr una reducción de las emisiones del sector incluso si la superficie del Arroz aumenta, siempre y cuando se apliquen mecanismos que aborden a todos los cultivos intensivos en carbono de manera integral. Esta reducción en la superficie cultivada tiene un efecto en los precios de Tubérculos, los cuales se incrementan hasta en S/1.80 por kilogramo en el 2030 respecto a la Proyección Base.

Respecto al ingreso agrícola anual, la diferencia del ingreso al 2030 que existe entre la Proyección Base y la Alternativa de Costos y Precios se puede interpretar como el costo de cumplimiento del compromiso de mitigación nacional. Esta diferencia es de S/. 7 615.30 anual lo cual representa -11% respecto a la Proyección Base. Cabe mencionar que la Alternativa de Precios es la única que genera un aumento en el ingreso agrícola en el 2030, el cual equivale a S/. 1 314.80 más que en la Proyección Base, lo que significa un ingreso 1.9% mayor. Esto se explica porque esta Alternativa se centra en incrementar los precios y no afectar directamente los costos de producción, a diferencia de las otras dos Alternativas.

Futuras investigaciones deberían continuar profundizando en los mecanismos de incorporación de información en el modelo con otros niveles de detalle tanto para variables económicas, como agrícolas y ambientales, para así continuar mejorando la precisión de los resultados del modelo. Para profundizar en las variables agrícolas, se puede continuar desagregando los dominios y categorías de cultivo, en la medida que la disponibilidad de data lo permita. Para profundizar en las variables ambientales, se recomienda incluir una restricción adicional que establezca el presupuesto de carbono del país, definiéndolo como un límite máximo de emisiones. La restricción de disponibilidad de agua también sería un gran aporte para investigaciones futuras, así como inclusión de shocks climáticos que permita simular eventos como el Fenómeno del Niño y de la Niña. Como mecanismos adicionales a explorar se recomienda observar la dinámica del sector con la incorporación de nuevas categorías de cultivo con menos intensidad de carbono, por ejemplo, Arroz de Secano.

Bibliografía

- Aryal, J. P., Rahut, D. B., Sapkota, T. B., Khurana, R., & Khatri-Chhetri, A. (2019). Climate change mitigation options among farmers in South Asia. *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00345-0>
- Attavanich, W., McCarl, B. (2011). The effect of Climate Change, CO₂ Fertilization, and Crop-Production Technology on Crop Yields and its Economic Implications on Market Outcomes and Welfare Distribution
- Banco Mundial (2018). Agricultura y Alimentos. <http://www.bancomundial.org/es/topic/agriculture/overview>
- Beach, R. H., Cai, Y., Thomson, A., Zhang, X., Jones, R., McCarl, B. A., ... Boehlert, B. (2015). Climate change impacts on US agriculture and forestry: benefits of global climate stabilization. *Environmental Research Letters*, 10(9), 095004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/9/095004>
- Biederman, L.A. & Harpole, S. (2013). Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. *Bioenergy*, 5: 202- 214.
- Chen, S., Chen, X., & Xu, J. (2016). Impacts of climate change on agriculture: Evidence from China. *Journal of Environmental Economics and Management*, 76(C), 105-124.
- Chen, S., Chen, X., Xu, J. (2014) Impacts of climate change on agriculture: Evidence from China. *Journal of Environmental Economics and Management*
- De La Torre Ugarte, D., Ray, D. (2000) Biomass and Bioenergy applications of the POLYSYS modeling framework. *Biomass and Bioenergy*. 18(4):291-308
- Delincé, J., Ciaian, P., & Witzke, H.-P. (2015). Economic impacts of climate change on agriculture: the AgMIP approach. *Journal of Applied Remote Sensing*, 9(1), 097099. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.9.097099>
- Devex (2017) Will the global food system sink the SDGs?
- Fairtrade (2017) Café FairTrade: Preguntas y Respuestas
- FAO (2018a) The State of Agricultural Commodity Markets 2018. Agricultural trade, climate change and food security. Rome.
- FAO (2018b) Rice Landscapes and Climate Change
- Fernandez J. (2017) Economic effects of climate change on agricultura: multi-scale assessment throught regional mathematical programming models.
- Frank, S., Havlík, P., Stehfest, E., van Meijl, H., Witzke, P., Pérez-Domínguez, I., van Dijk, M., Doelman, J., Fellman, T., Koopman, J., Tabeau, A., Valin, H. (2018). Agricultural non-CO₂ emission reduction potential in the context of the 1,5°C target. *Nature Climate Change*.
- Frelih-Larsen, A. y Dooley, E. (2014) Technical options for climate change mitigation in UE Agriculture
- Future Brand (2019) FutureBrand Country Index - FCI

- Huber, K. (2018) Descarbonizing U.S. Agriculture, Forestry, and Land Use. *Climate Innovation 2050*.
- INEI (2017) Encuesta Nacional Agropecuaria – ENA 2017
- INEI (1994) Elasticidad de la Demanda de los principales Bienes y Servicios consumidos por las Familias de Lima.
- International Trade Center – ITC (2017) Climate Change and the AgriFood Trade.
- IPCC (2019) Paris Agreement - Status of Ratification
- IPCC (2014) Fifth Assessment Report
- IPCC (2006) Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories
- Larson, D. F., Dinar, A., & Blankespoor, B. (2012). Aligning climate change mitigation and agricultural policies in Eastern Europe and Central Asia (N.o WPS6080; pp. 1-79).
- LSE (2019) ‘Climate Spring’ reaches the financial sector.
- Ministerio de Agricultura – MINAGRI (2017). Series de Estadísticas de Producción Agrícola
- Ministerio de Agricultura – MINAGRI (2014). Reporte Anual de Gases de Efecto Invernadero.
- Ministerio de Agricultura – MINAGRI (2013) El sector agrario y el cambio climático.
- Ministerio de Ambiente – MINAM (2018) Informe Final de Contribuciones Nacionales.
- Ministerio del Ambiente – MINAM (2016a) Contribuciones Nacionalmente Determinadas.
- Ministerio del Ambiente – MINAM (2016b) Tercera Comunicación Nacional.
- Ministerio del Ambiente – MINAM (2014) Estrategia Nacional ante el Cambio Climático
- Ministerio de Agricultura – MINAGRI (2019). Ley N°27360. Ley de Promoción Agraria.
- Ministerio de Agricultura – MINAGRI (2012). Reporte Anual de Gases de Efecto Invernadero.
- Ministerio de Agricultura – MINAGRI (2010). Reporte Anual de Gases de Efecto Invernadero.
- Ministerio de Agricultura – MINAGRI (2005). Reporte Anual de Gases de Efecto Invernadero.
- Ministerio de Agricultura – MINAGRI (2000). Reporte Anual de Gases de Efecto Invernadero.
- PAGE (2017). Documento Resumen - Perú: Crecimiento Verde. Análisis cuantitativo de políticas verdes en sectores seleccionados de la economía.
- PLANCC (2014) Catálogo de Opciones de Mitigación
- Schletz, M. C., Konrad, S., Staun, F., Desgain, D. (2017) Taking stock of the (I)NDCs of developing countries: regional (I)NDC coverage of mitigation sectors and measures.
- Schaeffer R. (2018). Ratcheting up Brazil’s Nationally Determined Contribution (NDC)
- Seminario, Bruno, 2008. El Costo Económico del Cambio Climático en la Comunidad Andina. *Universidad del Pacífico*. Lima.
- SUNAT (2007). Informe N° 190-2007-SUNAT/2B0000. Lima, Perú
- The conversation (2018). The private sector, agriculture and climate change.
- Tol (2010) The Economic Impact of Climate Change. *Perspektiven der Wirtschaftspolitik* 11(21): 13-

Vergara, W., Fenhann, J., Scheltz, M. C. (2015). *Zero carbon Latin America: a pathway for net decarbonisation of the regional economy by mid-century : vision paper*. Copenhagen: UNEP DTU Partnership.

World Economic Forum (2019). *The Global Risks Report 2019*.

Anexos

Anexo 1. Incentivo perverso de los fertilizantes chinos

La maquinaria agrícola, el consumo de fertilizantes, el empleo de pesticidas, la inversión agrícola y la sequía son factores importantes para las emisiones de CO₂ en la agricultura de China. La innovación tecnológica como las intervenciones políticas para el establecimiento de un entorno propicio e incentivo. Para transitar de la energía tradicional basada en recursos fósiles a la energía renovable en el sector agrícola, el Ministerio de Agricultura de China ha implementado una serie de leyes y regulaciones de agricultura sostenible para promover el desarrollo de estufas que ahorran combustible, biogás y energía solar; En consecuencia, la proporción del uso de energía de biomasa ha disminuido mucho en las zonas rurales. Los gobiernos chinos han otorgado subsidios perversos a la producción de fertilizantes nitrogenados, que solía desempeñar un papel positivo en el impulso de la industria de fertilizantes de China y en el aumento de los rendimientos de los cultivos. Sin embargo, este subsidio se ha convertido en un obstáculo para la lucha contra el uso excesivo de fertilizantes nitrogenados, responsable de las considerables emisiones de NO al aire.

Anexo 2. Oportunidades de reducción de emisiones agrícolas en LAC

La agricultura orgánica reemplaza a los insumos químicos en la producción agrícola por fuentes naturales. En particular, en la agricultura orgánica, los fertilizantes sintéticos que liberan N₂O se sustituyen por productos naturales. El mercado de la agricultura orgánica ha crecido exponencialmente. Quince países de ALC han promulgado regulaciones sobre agricultura orgánica, y otros cuatro están elaborando reglamentos sobre agricultura orgánica. Costa Rica y Argentina han alcanzado el estado de terceros países de acuerdo con las regulaciones de la UE sobre agricultura orgánica.

La agricultura sin labranza se define como un sistema de siembra de cultivos en suelos sin labrar, que consiste en abrir un surco suficientemente estrecho para obtener una cobertura adecuada de las semillas. El programa “Agricultura de Baixo Carbono” (ABC), un ambicioso esfuerzo agrícola de baja emisión de carbono apoyado por el gobierno brasileño, incluye la no labranza como un elemento central de sus actividades (Magalhães & Lunas Lima, 2014).

La fertilización de liberación controlada (FLC). Los fertilizantes de liberación controlada pueden reducir las emisiones de N₂O mediante la liberación de N cuando se acerca el momento de la absorción por la planta y, por lo tanto, limitan la cantidad de N expuesto a condiciones de desnitrificación.

Anexo 3. Precios del año base

Categorías	Precios
Algodón	S/.3.41
Arroz	S/.1.13
Café y cacao	S/.5.80
Caña de azúcar	S/.0.10
Frutas de consumo interno	S/.0.94
Frutas de exportación	S/.3.00
Granos y cereales	S/.1.48
Legumbres	S/.2.70
Maíz	S/.1.61
Maíz amarillo duro	S/.0.94
Pastos	S/.0.21
Tubérculos	S/.0.78
Verduras de consumo interno	S/.1.02
Verduras de exportación	S/.3.79

Fuente: elaboración propia con datos de SEPA

Anexo 4. Rendimientos del año base

CATEGORÍA	COSTA NORTE	COSTA CENTRO	COSTA SUR	SIERRA NORTE	SIERRA CENTRO	SIERRA SUR	SELVA
Algodón	3,080.38	2,759.64	-	-	389.85	-	613.86
Arroz	8,589.60	13,644.25	15,390.49	7,625.61	4,988.46	15,390.49	5,363.84
Café y cacao	642.23	-	-	1,060.78	601.38	445.38	816.55
Caña de azúcar	113,084	80,180.72	123,577.00	-	39,220.00	-	87,168.44
Frutas de consumo interno	13,290.87	25,346.32	24,552.45	8,296.17	17,512.65	8,560.19	12,923.60
Frutas de exportación	10,146.96	15,096.51	9,974.20	6,505.30	3,935.45	8,168.82	2,335.93
Granos y cereales	951.5	1,788.22	4,541.48	1,219.19	1,297.11	1,728.47	2,619.42
Legumbres	2,900.85	5,178.77	4,836.00	2,124.78	2,534.33	3,216.43	2,170.87
Maíz	5,756.40	5,339.36	5,919.96	1,789.81	3,196.42	4,179.41	1,245.31
Maíz amarillo duro	6,369.50	8,880.30	7,786.36	3,380.77	7,723.20	3,324.07	2,454.17
Pastos	68,322.54	33,372.37	31,405.05	70,670.21	38,393.14	36,806.82	-
Tubérculos	17,164.39	19,139.23	-	12,353.15	9,620.56	20,709.12	14,303.69
Verduras de consumo interno	41,698.27	50,628.45	34,790.62	44,017.91	29,798.84	23,046.90	14,492.63
Verduras de exportación	11,335.74	14,366.46	-	11,878.44	6,561.71	8,306.35	-

Fuente: elaboración propia con datos de SEPA

Anexo 5. Tierra cultivada del año base

CATEGORÍA	COSTA NORTE	COSTA CENTRO	COSTA SUR	SIERRA NORTE	SIERRA CENTRO	SIERRA SUR	SELVA
Algodón	673	7,046.00	-	-	64	-	102
Arroz	141,146.71	5,432.00	20,224.55	30,094.29	43.09	0.45	225,494.91
Café y cacao	8,534.39	-	-	65,566.93	49,376.09	34,581.29	413,377.30
Caña de azúcar	71,007.00	18,813.00	598	-	116	-	7,896.00
Frutas consumo interno	4,310.80	4,952.37	202.77	8,051.27	12,358.68	4,889.23	48,737.88
Frutas de exportación	69,765.00	33,796.00	2,114.00	18,087.03	33,600.07	10,211.00	109,586.90
Granos y cereales	653.9	8.14	2,374.80	110,179.86	107,757.86	42,491.20	91.23
Legumbres	7,340.69	4,020.70	4,616.08	45,285.73	40,307.45	28,301.04	24,573.32
Maíz	9,219.71	14,671.87	9,197.65	70,208.58	75,969.78	70,194.35	6,728.07
Maíz amarillo duro	45,482.42	36,779.18	45.55	27,309.40	31,003.61	1,175.45	123,219.38
Tubérculos	28,916.95	18,001.45	-	33,946.03	42,080.31	32,559.37	265,743.89
Verduras de consumo interno	7,586.46	21,665.15	2,521.07	7,192.54	790.85	1,207.77	47.16
Verduras de exportación	8,753.48	19,860.47	-	6,028.52	2,595.53	3,778.00	-

Fuente: elaboración propia con datos de la ENA y el SEPA

Anexo 6. Límites mínimos y máximos para variación de tierras cultivadas

CATEGORÍA	MIN (a _i)	MAX (b _i)
FRUTAS EXPORT	1.73%	11.02%
FRUTAS NACIONALES	-1.54%	8.42%
CAFÉ Y CACAO	-5.23%	6.78%
ARROZ	-3.46%	5.02%
ALGODÓN	-5%	0.19%
CEREALES	-6.79%	5.20%
TUBÉRCULOS	-2.20%	2.30%
OTROZ MAÍCES	-6.70%	4.08%
MAD	-10.09%	9.78%
LEGUMBRES	-5.55%	3.49%
VERDURAS EXPORT	-4.47%	5.85%
VERDURAS NACIONALES	-3.58%	4.76%
CAÑA DE AZÚCAR	-4.85%	9.92%
PASTOS	-1.53%	4.71%

Fuente: elaboración propia con datos de SEPA

Anexo 7. Factores de GEI según categoría y fuente de emisión

	Arrozales Anegados	Suelos agrícolas				Quema de residuos
		Residuos de cosecha	Fertilizantes sintéticos		Fijadores	
			D	I		
Pastos			5.91944E-05	4.0252E-05	0.00597598	0
Maiz		5.44551E-05	0.000616571	0.00041927		2.2068E-05
Leguminosas		0.000162613	0.00026987	0.00018351	0.00114673	3.2488E-05
Tubérculos		0.000195528	0.000458379	0.0003117	1.5608E-05	1.433E-05
Frutas nacionales / Piña		0.010132136	5.91944E-05	4.0252E-05		0
Vegetales nacionales		0.000808954	0.000547388	0.00037222		0.00024308
Frutas de exportación		0.000843986	0.000303893	0.00020665		0.00018328
Vegetales de exportación		0.00026625	0.000875033	0.00059502		7.3442E-05
C&C		4.58327E-05	0.000158538	0.00010781		6.4801E-06
MAD		5.44551E-05	0.000616571	0.00041927		2.2068E-05
Azúcar			0.000459741	0.00031262		0.00162442
Arroz	0.00323465	7.3186E-05	0.001438709	0.00097832		0.00012272
Algodón			0.000836566	0.00056886		0.00016063
Granos y cereales		1.72778E-05	0.000125221	8.515E-05	1.4605E-06	6.7735E-06

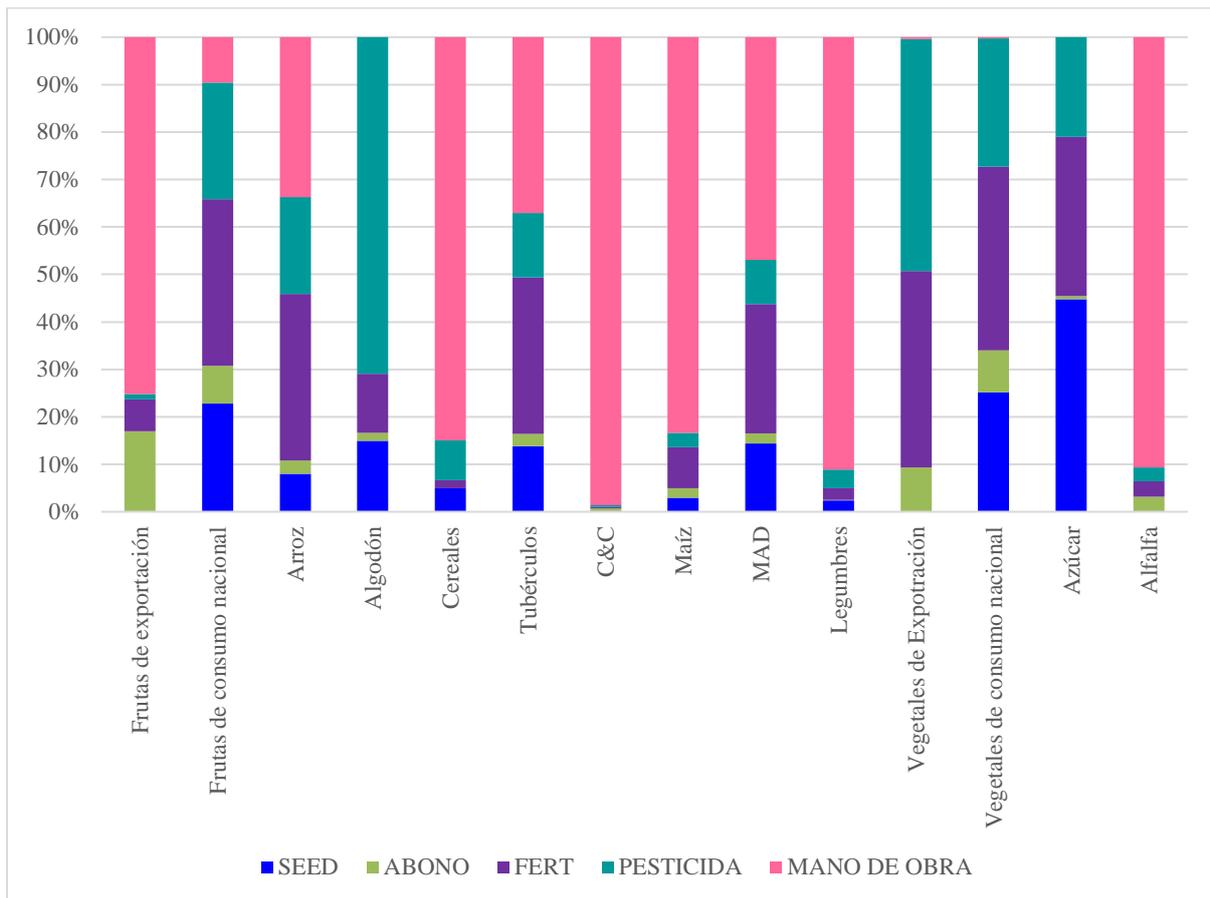
Fuente: Elaboración propia con datos de MINAGRI e IPCC

Anexo 8. Porcentajes de consumo de fertilizante por cultivo y tipo de fertilizante

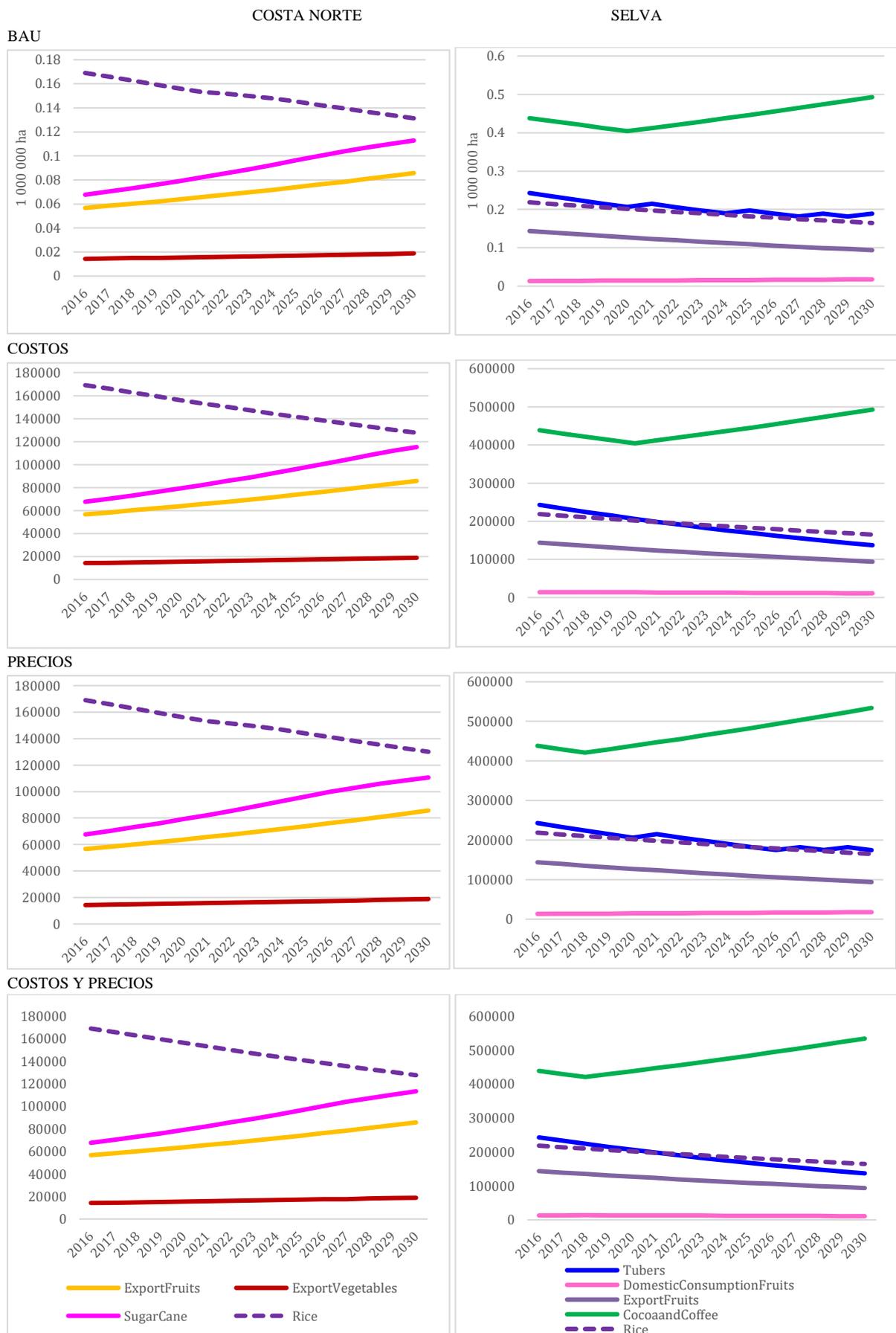
Cultivos	Urea	Fosfato diamónico	Sulfato de amonio	Nitrato de amonio
Arroz	50%	13%	50%	
Maíz	25%	16%	25%	
Trigo	1%	4%	1%	
Cebada	1%	5%	1%	
Quinoa	0%	2%	0%	
Cañihua	0%	0%	0%	
Kiwicha	0%	0%	0%	
Frijol	1%	3%	1%	
Maní	1%	0%	1%	
Arveja	1%	5%	1%	
Haba	1%	2%	1%	
Pallar	0%	0%	0%	
tarwi	0%	0%	0%	
Soya	0%	0%	0%	
Alfalfa*		5%		
Papa	10%	9%	10%	15%
Yuca	1%	3%	1%	5%
Camote	0%	0%	0%	
Caña de azucar	1%	3%	1%	10%
Alcachofa		0%		5%
Algodón	1%	0%	1%	
Cebolla	1%	1%	1%	
Tomate	0%	0%	0%	
Espárrago		1%		10%
Café	1%	13%	1%	10%
Palma aceitera	1%	2%	1%	5%
Olivo	1%	0%	1%	
Cacao	1%	4%	1%	5%
Exportación	0%	0%	0%	
Uva		1%		5%
Banana		5%		10%
Mango		1%		5%
Palta		1%		5%
Mandarina		0%		5%
Frutas nacional	1%	0%	1%	5%
Piña		0%		
	100%	100%	100%	100%

Fuente: elaboración propia con datos de YARA Perú.

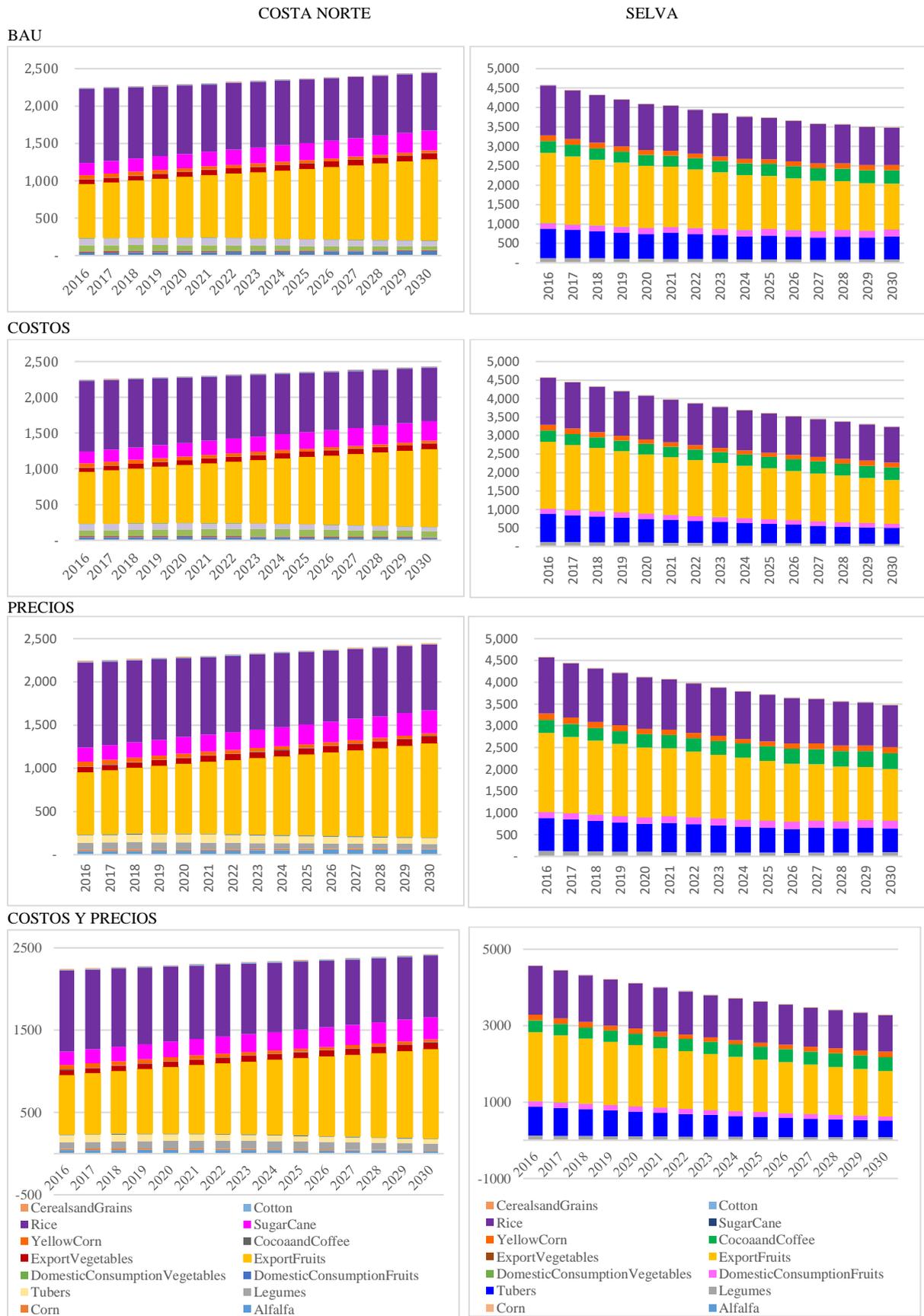
Anexo 9. Participación de factores de producción en estructura de costos (%), 2016



Anexo 10. Evolución detallada de superficie del escenario base y mecanismos (ha), 2016 – 2030



Anexo 11. Evolución detallada de emisiones del escenario base y mecanismos (Gg de CO₂e), 2016 – 2030



Nota Biográfica

Andrea Ximena Gómez Lavi

Ingeniera Ambiental especializada en cambio climático y economía ambiental. Amplia experiencia en proyectos de desarrollo social, trabajando como consultora para organizaciones nacionales e internacionales como el Ministerio de Agricultura del Perú, Ministerio de Educación del Perú, Agencia de Comercio Exterior de Uruguay, Resources and Rights Initiative – Latinoamérica, WWF Perú, Universidad del Pacífico, entre otras. Se desempeña desde el 2016 como Presidenta del Sub-Comité Técnico de Normalización de Gases de Efecto Invernadero y Huella Hídrica en el INACAL.