

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL INDUSTRIAL



Profesor Patrocinante:

Dr. Cristian Mardones Poblete

Informe de Memoria de Título

para optar al título de:

Ingeniero Civil Industrial

ESTIMACIÓN DE UN SISTEMA DE DEMANDA PARA LA
EVALUACIÓN DE POLÍTICAS CLIMÁTICAS EN COSTA RICA

Concepción, septiembre de 2022

Esteban Nicolás Alvial Campos

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil Industrial

Profesor Patrocinante:
Dr. Cristian Mardones Poblete

Estimación de un sistema de demanda para la evaluación de políticas climáticas en Costa Rica

Esteban Nicolás Alvial Campos

Informe de Memoria de Título
para optar al Título de

Ingeniero Civil Industrial

Septiembre de 2022

Resumen

Estimación de un sistema de demanda para la evaluación de políticas climáticas en Costa Rica

Esteban Nicolás Alvial Campos

Septiembre 2022

PROFESOR GUIA: **Dr. Cristian Alejandro Mardones Poblete**

PROGRAMA: **Ingeniería Civil Industrial**

En el presente estudio se analiza el impacto de un impuesto al carbono sobre las emisiones de CO₂ en Costa Rica. Para lo anterior, se estima un sistema de demanda usando los datos de una encuesta de gasto de hogares, lo cual permite obtener las elasticidades de demanda para diversos grupos de bienes. Luego, se implementa la extensión ambiental del modelo de precios Leontief para determinar el cambio en los precios causado por diferentes tasas de impuesto al carbono. Posteriormente, ambos modelos son vinculados a través de un enfoque top-down para obtener los cambios en la producción y emisiones sectoriales. Los principales hallazgos sugieren que los impuestos al carbono afectan principalmente al sector transporte, mientras que el resto de los sectores tienen impactos leves en todos los escenarios impositivos simulados. Lo anterior, se explica por la composición de la matriz energética de Costa Rica, la cual tiene una altísima participación de energías renovables. Finalmente, se sugieren algunas opciones de políticas climáticas para contribuir a la carbono neutralidad de este país.

Abstract

Demand system estimation for the evaluation of environmental policy in Costa Rica

Esteban Nicolás Alvial Campos

September 2022

THESIS ADVISOR: Cristian Alejandro Mardones Poblete, PhD

PROGRAM: Industrial Engineering

This study analyzes the impact of a carbon tax in Costa Rica. To do this, a demand system model based on household expenditure surveys that estimates price and income elasticities for different groups of goods is used. Then an extended environmental version of the Leontief price model to compute price changes caused by different carbon tax rates is employed. Subsequently, both models are linked through a top-down approach to obtain the exchange in sectorial production and emissions. The findings suggest that a carbon tax mainly affects the transport sector, which can be explained by Costa Rica's energy matrix composition, mainly composed of renewable energy. Finally, alternative environmental policies that contribute to the attainment of carbon neutrality for the nation are suggested.

Tabla de contenidos

1.	Introducción	1
1.1.	Justificación del tema.....	2
1.2.	Objetivo general	2
1.3.	Objetivos específicos	3
2.	Revisión bibliográfica	3
2.1.	Factores que afectan el consumo residencial de energía	3
2.2.	Modelos de sistemas de energía	4
2.2.1	Modelos bottom-up.....	4
2.2.2	Modelos top-down	5
2.2.3	Modelos híbridos	7
2.3.	Estimación de sistemas de demanda de energía	7
2.4.	Aplicaciones empíricas para Costa Rica	9
3.	Metodología	10
3.1.	Teoría del consumidor	10
3.2.	Estimación de sistemas de demanda	13
3.3.	Modelo insumo-producto	18
3.4.	Modelo de precios de Leontief	20
3.5.	Descripción de los datos disponibles	22
3.6.	Estimación de emisiones sectoriales de CO ₂	25
3.7.	Vinculación de modelos a través del enfoque top-down.....	27
4.	Resultados	28
4.1.	Resultados de la estimación de los modelos AIDS y QUAIDS	28
4.2.	Resultados del modelo de precios de Leontief	31
4.3.	Impactos en la producción sectorial según escenario impositivo	32
4.4.	Impacto en las emisiones sectoriales según escenario impositivo.....	35
5.	Conclusiones	38
	Referencias	40
	Anexos.....	45
	Anexo A: Agregación de productos y servicios en sectores económicos.....	45
	Anexo B: Parámetros estimados en los sistemas de demanda AIDS y QUAIDS	51
	Anexo C: Asignación de elasticidades precio propias.....	57
	Anexo D: Producción sectorial según escenario impositivo.....	58

Lista de tablas

Tabla 3-1: Estadísticas descriptivas de gasto porcentual total y precio de bienes y servicios de los hogares en colones (₡).....	23
Tabla 3-2: Datos utilizados para el cálculo de emisiones sectoriales	25
Tabla 3-3: Consumo sectorial de combustibles fósiles y estimación de emisiones de CO ₂	27
Tabla 4-1: Resultados de la estimación de los modelos AIDS y QUAIDS	30
Tabla 4-2: Resultados para prueba de Wald.....	31
Tabla 4-3: Variación porcentual de los precios sectoriales según escenario impositivo	32
Tabla 4-4: Variación porcentual de la producción sectorial según escenario impositivo....	34
Tabla 4-5: Reducción de las emisiones sectoriales según escenario impositivo (toneladas de CO ₂)	37
Tabla A- 1: Agregación de productos en 20 sectores económicos.....	45
Tabla A-1: Agregación de productos en 20 sectores económicos (continuación)	46
Tabla A-1: Agregación de productos en 20 sectores económicos (continuación)	47
Tabla A-1: Agregación de productos en 20 sectores económicos (continuación)	48
Tabla A-1: Agregación de productos en 20 sectores económicos (continuación)	49
Tabla A-1: Agregación de productos en 20 sectores económicos (continuación)	50
Tabla B-1: Parámetros estimados con el modelo AIDS	51
Tabla B-1: Parámetros estimados con el modelo AIDS (continuación)	52
Tabla B-1: Parámetros estimados con el modelo AIDS (continuación)	53
Tabla B-2: Parámetros estimados con el modelo QUAIDS	54
Tabla B-2: Parámetros estimados con el modelo QUAIDS (continuación).....	55
Tabla B-2: Parámetros estimados con el modelo QUAIDS (continuación).....	56
Tabla C-1: Asignación de elasticidades precio propias de grupos de bienes y servicio a cada sector económico	57
Tabla D-1: Producción sectorial y agregada según escenario impositivo.....	58

Lista de figuras

Figura 3-1: Estructura de una Matriz insumo-producto.....	18
Figura 3-2: Promedio del gasto mensual según categorías de bienes.....	24

1. Introducción

Costa Rica decidió beneficiarse de su potencial hídrico para la generación eléctrica hace más de un siglo, mucho antes que el cambio climático fuese primordial en la toma de decisiones. Según datos del Hub de Energía¹, este país alimenta el 100% de su red eléctrica con energías renovables (29,7% hidráulica, 49,2% geotérmica, 8,0% eólica, 13% biomasa). Además, este país firmó el Acuerdo de París y se comprometió mediante la Contribución Prevista Determinada a Nivel Nacional (NDC por sus siglas en inglés) a emitir un máximo de 9,4 millones de toneladas de CO₂ equivalente (CO₂eq) para el año 2030 (Ministerio de Ambiente y Energía, 2015). Posteriormente, esta meta fue actualizada por la NDC 2020 a un máximo de 9,1 millones de toneladas de CO₂eq (Ministerio de Ambiente y Energía, 2020). Ambas NDC son consistentes con la trayectoria del Plan Nacional de Descarbonización presentado por Costa Rica en 2019 que busca alcanzar emisiones netas iguales a cero en el 2050.

No obstante, el compromiso adquirido en el Plan Nacional de Descarbonización se convierte en un desafío para un país que ha tenido un aumento considerable en las emisiones de carbono desde el año 2015, sumado al hecho que su sector energético es responsable del 55,1% de las emisiones de gases de efecto invernadero². Por lo anterior, es importante evaluar medidas que reduzcan las emisiones mediante el estudio detallado de la demanda de energía. En particular, esta investigación analiza en profundidad los patrones de consumo energético a nivel residencial, el cual representa aproximadamente un tercio del consumo global de energía (International Energy Agency, 2021) y 38,8% en el caso específico de Costa Rica³.

Existen dos grandes alternativas metodológicas para estimar la demanda de energía a nivel residencial. La primera es realizando una regresión uniecuacional en donde la cantidad demandada se relaciona con los precios, ingresos u otros factores. Sin embargo, este enfoque ignora la correlación del error de esa regresión con la demanda de otros bienes. La segunda alternativa es estimar un sistema de demanda que considera una canasta conformada por distintos grupos de bienes y/o servicios, lo cual permite definir explícitamente restricciones que los parámetros de las funciones de demanda deben cumplir según la teoría microeconómica y obtener estimaciones más precisas.

En consecuencia, uno de los propósitos de esta memoria de título es estimar un sistema de demanda a nivel residencial en Costa Rica, enfatizando la desagregación de bienes energéticos. Para lo anterior, se utilizan diversas técnicas econométricas alternativas (modelos AIDS y QUAIDS) que permiten estimar simultáneamente la demanda de diversos grupos de bienes, considerando los precios, ingreso y las características socioeconómicas de los hogares. También, se calibra la extensión ambiental del modelo de precios de Leontief en

¹ <https://hubenergia.org/es/indicadores/generacion-primaria-con-energias-renovables>

²

<http://cglobal.imn.ac.cr/documentos/publicaciones/ComunicacionesNacionales/cuartacomunicacion/offline/CuartacomunicacionCC2021.pdf>

³ <https://www.inec.go.cr/documento/social-08-costa-rica-costa-rica-datos-reales-de-la-demanda-de-energia-electrica-en-gwh1-y>

Costa Rica para identificar los cambios en los precios inducidos por un impuesto al carbono. Finalmente, las elasticidades de demanda estimadas en la etapa inicial se combinan con los resultados del modelo intersectorial a través de un enfoque top-down para simular los cambios económicos y ambientales inducidos por un impuesto al carbono.

1.1. Justificación del tema

Las frecuentes apariciones de condiciones climáticas extremas y el empeoramiento del medioambiente han contribuido a que muchos países conviertan la reducción de emisiones CO₂ en una prioridad. Costa Rica es un país con un territorio continental de apenas 51.085 km², pero con una riqueza biológica equivalente al 4% del total mundial de especies de plantas y animales, lo que lo convierte en un país megadiverso y vulnerable a los efectos del cambio climático (Bermúdez & Obando, 2021). Costa Rica en su Plan de Descarbonización Nacional declara que una de sus vías para combatir el cambio climático es a través de impuestos a las emisiones de carbono, pero esa reforma tributaria aún no se ha implementado⁴. Aunque el país no posee un impuesto explícito a las emisiones de CO₂, sí recauda impuestos del sector energético⁵. Por otro lado, cualquier propuesta de impuestos al carbono requiere de algún tipo de modelación para medir las posibles recaudaciones y/o el efecto de mitigación de emisiones que se supone tendría la aplicación de este impuesto (Ministerio de Hacienda, 2020).

En este contexto, la presente memoria de título intenta aportar la información que requiere Costa Rica para el diseño de políticas climáticas. También, contribuye a la escasa literatura disponible en este país con respecto a la demanda de energía residencial (Zabaloy & Viego, 2022). Específicamente, la estimación de un sistema de demanda permitirá determinar las elasticidades precio de diversos bienes energéticos con el objetivo de evaluar políticas climáticas que reduzcan las emisiones de carbono. Finalmente, los resultados del enfoque top-down ayudarán a las autoridades a establecer la tasa de impuesto al carbono requerida para contribuir al cumplimiento de los compromisos adquiridos en el Acuerdo de París.

1.2. Objetivo general

El objetivo general de la memoria de título es estimar un sistema de demanda en Costa Rica a nivel de hogar y combinarlo con la extensión ambiental del modelo de precios de Leontief para determinar cómo cambiarían los patrones de consumo de electricidad, combustible,

⁴ <https://www.crhoy.com/economia/hacienda-pais-esta-a-decadas-de-aplicar-impuesto-al-carbono/#:~:text=%2D%20El%20Ministerio%20de%20Hacienda%20considera,abri%C3%B3%20para%20de%20descarbonizar%20la%20econom%C3%ADa.>

⁵ <https://www.oecd.org/tax/tax-policy/taxing-energy-use-costa-rica.pdf>

transporte y otros bienes si se establece un impuesto al carbono. Lo anterior, permitirá evaluar los impactos de políticas climáticas que contribuyan a reducir las emisiones de CO₂.

1.3. Objetivos específicos

- Realizar una revisión de la literatura sobre la estimación de sistemas de demanda y modelos intersectoriales extendidos ambientalmente.
- Estimar las elasticidades de la demanda residencial de bienes y servicios en Costa Rica, incluyendo elasticidades precio propias, elasticidades precio cruzadas y elasticidades ingresos.
- Calibrar un modelo intersectorial que permita identificar los impactos sobre los precios de políticas climáticas que reduzcan las emisiones de carbono.
- Combinar los resultados del modelo intersectorial y las elasticidades de demanda a través de un enfoque top-down para evaluar los cambios en el consumo de electricidad, combustibles, transporte y otros bienes en Costa Rica.
- Determinar cómo los impuestos al carbono contribuyen a la reducción de emisiones de CO₂ en Costa Rica.

2. Revisión bibliográfica

La literatura que explora los factores que influyen en el consumo energético de los hogares es bastante amplia. En esta sección se discutirá la evolución de los enfoques adoptados para abordar esta temática, considerando el uso de distintas metodologías y sus aplicaciones en el contexto energético.

2.1. Factores que afectan el consumo residencial de energía

El estudio sobre la elección de las fuentes de energía en el sector residencial se ha focalizado en países en desarrollo. Lo anterior, se explica porque muchos hogares de estos países frecuentemente consumen combustibles sólidos, tales como carbón o leña para la cocción de alimentos y calefacción. Este tipo de combustibles se caracterizan por ser baratos y muy contaminantes, por lo cual las autoridades buscan mecanismos para promover la transición hacia combustibles más limpios en contextos de pobreza energética. Según Waleed & Mirza (2020), la transición energética del sector residencial se apoyó inicialmente en la idea de la “escalera de energía” (o energy ladder en inglés). Este concepto asume que los hogares consumen productos energéticos que pueden ordenarse según su grado de complejidad tecnológica. A mayor nivel de ingreso o estatus social, los hogares tienden a subir por la escalera. En el peldaño más alto se encuentra la electricidad, seguido por el gas, queroseno, leña comprada y, por último, leña recolectada.

Sin embargo, Choumert-Nkolo et al. (2019) argumentan que la hipótesis de la escalera de energía no es suficiente para explicar el consumo energético residencial y que en las últimas décadas este concepto ha sido desafiado por una creciente literatura que destaca otros factores. Por ejemplo, Aziz et al. (2022) exploran múltiples variables que explican la elección de combustibles y estufas para cocinar en la ciudad de Bangladesh. Los autores encuentran que las viviendas con amplios espacios ventilados tienden a usar combustibles sucios y que mayores niveles de educación e ingreso se relacionan positivamente con el uso de combustibles limpios. Danlami et al. (2019) analizan los factores que influyen en la elección de fuentes de energía para iluminación a través de un modelo logit multinomial. El estudio agrupa las principales fuentes de iluminación en tres categorías: eléctrica, semi-eléctrica (linternas a batería y linternas recargables) y tradicional (leña, velas y lámparas tradicionales). Los resultados indican que un jefe del hogar masculino y el tamaño de la familia aumentan el uso de fuentes tradicionales y semi-eléctricas. Muller & Yan (2018) mencionan que existe un conjunto amplio de factores socioeconómicos adicionales al ingreso (edad, género, nivel de educación, tamaño del hogar, estilo de vida, características del hogar, costo de acceso y costo de oportunidad) que influyen en la elección de combustibles cuyo efecto varía ampliamente según la ubicación geográfica.

2.2. Modelos de sistemas de energía

La literatura sobre modelos de sistemas de energía es extensa. Sin embargo, la aproximación analítica de la demanda de energía se puede agrupar en dos grandes categorías: de arriba hacia abajo (o top-down en inglés) y de abajo hacia arriba (o bottom-up en inglés).

2.2.1 Modelos bottom-up

Los modelos bottom-up se caracterizan por su alto nivel de detalle tecnológico y datos desagregados que se usan para estudiar el sector energético a nivel regional, nacional o global (Subramanian et al. 2018). Según Prina et al. (2021), los modelos bottom-up poseen las siguientes características: cobertura sectorial (cantidad de sectores que el modelo puede representar), cobertura geográfica (nivel geográfico implementado en el modelo) y horizonte de tiempo (corto, mediano o largo plazo). Estos modelos requieren una gran cantidad de información ya que trabajan con datos individuales para estimar consumos de energía a nivel agregado. No obstante, estos modelos suelen desatender los impactos a escala macroeconómica ya que el sector energético representa una pequeña fracción de la economía.

Algunas aplicaciones recientes con esta metodología se discuten a continuación. Filippini & Obrist (2022) comparan el consumo total de energía en edificios con y sin certificación verde en Suecia. Esta certificación garantiza que edificaciones nuevas o remodeladas alcancen estándares medioambientales y de eficiencia energética. El modelo utiliza datos de panel de

aproximadamente 1500 hogares entre los años 2010-2015, los cuales contienen información sobre los edificios, características de los hogares, y consumo de gas y electricidad. Según las estimaciones, los hogares de edificios con certificación verde consumen 25% menos de energía. Tang et al. (2021) desarrollan un modelo de tecnología energética para el sector urbano de China que permite evaluar diversas metas de descarbonización. El modelo identifica las mejores tecnologías utilizadas en los hogares (acondicionadores, hervidores, cocinas, cocinillas, etc.) que sean capaces de minimizar el consumo total de energía. Lo anterior, a partir de datos que incluyen precios de la energía, factores de emisión, inversión inicial de las tecnologías, costos de mantenimiento, eficiencias y la demanda de energía de estos artefactos. Los autores concluyen que es necesario reducir considerablemente el uso de dispositivos que consuman carbón, queroseno, gas licuado de petróleo y biomasa tradicional para lograr la descarbonización del sector urbano antes del año 2050. Shinde et al. (2022) investigan el efecto rebote (o rebound effect en inglés)⁶ del consumo energético en los hogares de Suiza. Con un enfoque de machine learning evalúan los impactos ambientales del consumo energético del sector urbano, considerando factores socioeconómicos y características de las viviendas a través de datos recolectados entre los años 2006-2017. Los resultados demuestran que la variabilidad del efecto rebote es grande entre hogares, incluso dentro de grupos de ingresos similares. Yan et al. (2020) proyectan el consumo eléctrico y emisiones de carbono para el periodo 2015-2040 en el sector residencial de Japón. El estudio emplea nueve escenarios distintos que consideran los siguientes factores: ingreso per cápita, tamaño de la población, tamaño familiar, tamaño de vivienda, metros cuadrados de la vivienda, estilo de vida y condiciones climáticas. Los resultados indican que el consumo eléctrico total alcanzará su valor máximo durante el año 2020 y las emisiones totales de carbono tenderán a disminuir hacia el año 2040.

2.2.2 Modelos top-down

Los modelos top-down tratan al sector residencial como un usuario final de energía, no priorizan el análisis de consumo a nivel individual y generalmente utilizan datos agregados para la estimación de indicadores macroeconómicos. Estos modelos consideran todos los sectores económicos y sus conexiones intersectoriales (Subramanian et al., 2018). Lo anterior, les permite ser útiles para simular políticas a nivel agregado (Hall & Buckley, 2016). Los modelos CGE (o computable general equilibrium en inglés) son populares en la aplicación del método top-down debido a que tratan de representar la estructura económica de manera completa. La elaboración de un modelo CGE requiere diseñar un sistema de ecuaciones no lineales que representen el comportamiento de los productores y consumidores que participan en el mercado (Fabregat-Aibar et al., 2022).

La literatura empírica sobre modelos CGE para el análisis de políticas ambientales o energéticas es abundante. Por ejemplo, Chen et al. (2022) analizan el impacto de políticas

⁶ El efecto rebote ocurre cuando consumidores eligen no adquirir un producto debido a su relación conocida con emisiones, para luego gastar ese dinero ahorrado en un producto que provoca nuevas emisiones.

ambientales que promueven la transición de carbón a gas natural en el sector residencial de China, en este estudio se consideran cuatro escenarios en los cuales varía la tasa de sustitución de las fuentes energéticas. Los resultados muestran que las emisiones de carbono disminuyen considerablemente en todos los escenarios, aunque la transición influye negativamente en el Producto Interno Bruto (PIB). An et al. (2021) exploran el potencial que posee el sector residencial de China para participar en un sistema de transacción de emisiones. Las simulaciones indican que la participación de los hogares en esta política climática reduciría los costos de abatimiento y que la venta de permisos de emisión contribuiría a mejorar los ingresos de los hogares, especialmente en zonas rurales.

Otra metodología popular dentro del enfoque top-down es el modelo insumo-producto (input-output) originalmente planteada por Leontief (1966). Un modelo insumo-producto permite estudiar la relación entre la economía y energía, considerando las diversas actividades económicas que requieren energía para llevar a cabo su producción (Chai et al., 2021). La ventaja de este modelo reside en el uso de matrices insumo-producto (input-output tables en inglés), las cuales se encuentran fácilmente disponibles en los bancos centrales o institutos nacionales de estadísticas de cada país.

Este tipo de modelo ha sido aplicado para evaluar políticas que afectan el consumo residencial de energía. Por ejemplo, Ma et al. (2016) comparan las emisiones indirectas de CO₂ en Estados Unidos y China asociadas al consumo energético del sector urbano. Los resultados reflejan que los hogares de Estados Unidos emiten indirectamente mayor cantidad de emisiones que China. Sin embargo, se aprecia una tendencia creciente de estas emisiones en China y una tendencia decreciente en Estados Unidos. Duarte et al. (2021) examinan las relaciones entre consumo residencial, desigualdad de ingresos y tendencias globales de emisiones de carbono en países pertenecientes a la Unión Europea. Los autores utilizan un Multi-Regional Input-Output Model (MRIO) calibrado con datos entre los años 1999-2015. Los resultados muestran que aumentar los ingresos de los hogares pobres llevaría a un aumento en emisiones debido a sus patrones de consumo. Los hallazgos también revelan que una convergencia en los patrones de consumo podría reducir las emisiones del sector residencial aproximadamente en 5%. Bjelle et al. (2018) implementan un modelo MRIO en Noruega para calcular el potencial de reducción en la huella de carbono asociado a cambios en el consumo residencial. Los resultados indican que reducciones de la huella de carbono entre 35% y 45% son posibles sin la necesidad de aplicar cambios masivos en los hábitos de consumo. Por ejemplo, si los consumidores destinan una menor cantidad de dinero a comprar bienes intensivos en el uso de combustibles fósiles (ej. transporte) y recursos (ej. vestuario). Song et al. (2019) cuantifican la huella de carbono de los hogares de Estados Unidos para el periodo 1995-2014 mediante un modelo input-output. El análisis revela que el sector residencial de este país fue responsable de más del 15% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero en 2009. Adicionalmente, los autores mencionan que la huella de carbono per cápita se relaciona positivamente con los niveles de ingresos de los hogares, por lo que recomiendan políticas climáticas que apunten a reducir el consumo de bienes intensivos en emisiones.

2.2.3 Modelos híbridos

Puesto que los modelos bottom-up y top-down presentan ventajas y desventajas, varios estudios han tratado de combinarlos. Los modelos híbridos combinan el detalle tecnológico de los modelos bottom-up con la riqueza económica de los modelos top-down. Los modelos híbridos actualmente se enfocan en temáticas que relacionan energía, emisiones, aplicación de tecnologías y análisis de variables macroeconómicas (Lee et al., 2020). Por ejemplo, Su et al. (2021) vinculan el modelo bottom-up China-MAPLE y el modelo top-down KLEM-CHN para evaluar políticas energéticas en China. Los resultados muestran que la electrificación de vehículos para transporte privado permite reducir los costos de descarbonización de los hogares a largo plazo y eliminar gradualmente el consumo de productos derivados del petróleo. Gupta et al. (2020) evalúan las implicaciones macroeconómicas de las estrategias de desarrollo bajas en carbono en India. Los autores vinculan el modelo bottom-up AIM y el modelo top-down IMACLIM. Los resultados demuestran que el impacto de las metas de descarbonización sobre el crecimiento económico es levemente positivo. Campagnolo & Cian (2022) usan un modelo híbrido para evaluar las implicaciones macroeconómicas causadas por impactos climáticos e impuestos al carbono en Italia. El modelo es capaz de comparar los efectos en distintas regiones italianas, caracterizadas por variadas condiciones climáticas. Los resultados indican que el cambio climático disminuye el gasto residencial en energía por la menor necesidad de calefacción, aunque la disminución en gasto es menor en los grupos más pobres de la población. Sumado a que, el consumo de electricidad destinada al aire acondicionado aumenta en las regiones que poseen condiciones climáticas más suaves.

2.3. Estimación de sistemas de demanda de energía

La popularidad del modelo Almost Ideal Demand System (AIDS) propuesto originalmente por Deaton & Muellbauer (1980a) se basa en su facilidad de aplicación y consistencia con la teoría del consumidor. Este modelo examina las decisiones de los consumidores para escoger una canasta de bienes que maximice su utilidad sujeta a la restricción de presupuesto (Rosas-Flores et al., 2017). Existe una simplificación lineal del modelo AIDS conocida como Linear Approximate Almost Ideal Demand System (LA-AIDS), la cual se obtiene al incorporar tres restricciones adicionales al sistema de ecuaciones (Wakamatsu & Miyata, 2016). Otro modelo popular que se destaca en la literatura es la extensión cuadrática del modelo AIDS llamado Quadratic Almost Ideal System (QUAIDS) que fue propuesto por Banks et al. (1997). El modelo QUAIDS incorpora una variable no lineal a las ecuaciones de gasto, lo que permite una respuesta más flexible ante cambios en el ingreso. Finalmente, se puede mencionar el aporte de Shonkwiler & Yen (1999) quienes propusieron un procedimiento en

dos etapas para corregir la censura el sistema de demanda que surge cuando algunos hogares no compran ciertos bienes de la canasta de consumo analizada, lo cual dio origen al modelo QUAIDS censurado.

A continuación, se discuten algunas aplicaciones empíricas con los modelos para estimar sistemas de demanda. Du et al. (2021) examinan el efecto rebote del consumo energético residencial en zonas urbanas y rurales de China a través del modelo LA-AIDS. Los resultados reflejan una diferencia significativa en los efectos rebote de ambas zonas, siendo las zonas rurales las que presentan un efecto rebote menor. Sajjad & Rahman (2021) usan el modelo LA-AIDS para examinar la elección energética, patrones de consumo y presupuestos energéticos del sector residencial en Pakistán. Los resultados muestran los hogares en zonas urbanas destinan 8,7% de sus ingresos en energía, mientras que los hogares en zonas rurales 10,9%. Además, las elasticidades precio de la leña, electricidad y gas natural son inelásticas y que existen variaciones relevantes según zona urbana o rural.

Otros estudios asumen que el nivel de ingreso de los hogares posee un comportamiento no lineal con respecto al gasto. Con el objetivo de lograr resultados apropiados a esta conducta se implementa la extensión cuadrática del modelo AIDS. Varios estudios implementan este acercamiento para caracterizar los patrones de consumo energético. A modo de ejemplo, Garza et al. (2022) usan la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares de México del año 2018 para estimar la elasticidad precio de productos energéticos a través del modelo QUAIDS. El estudio indica que la demanda residencial de energía es inelástica, así que los hogares tienden a no cambiar su consumo energético cuando suben los precios. Sin embargo, se demuestra que los cambios en los precios tendrán mayor impacto en los hogares de menores ingresos. Okonkwo (2021) utiliza las elasticidades precio de la demanda obtenidas con el modelo QUAIDS para simular la respuesta del sector residencial de África del Sur ante distintos cambios en los precios en electricidad, combustible, transporte público y alimentos provocados por un impuesto al carbono. La estimación de este modelo con los datos de la Encuesta de Ingresos y Gastos y datos de la Encuesta de Condiciones de Vida indican que las clases baja y media sufren las mayores pérdidas de bienestar económico. Similarmente, Li et al. (2020) modelaron el impacto de impuestos al carbono sobre el bienestar de los hogares urbanos y rurales de China usando un sistema de demanda estimado con un modelo QUAIDS. Los resultados arrojan que los impuestos al carbono impactan con mayor intensidad a los hogares ricos de áreas rurales, mientras que en las áreas urbanas los impuestos impactan fuertemente a los hogares pobres. Rasyid & Kristina (2021) estiman las elasticidades precio para la demanda de electricidad, agua, combustible y telecomunicaciones en los hogares de Indonesia. Los autores usan datos de panel extraídos de la Encuesta de Vida Familiar y fuentes secundarias. Las estimaciones del modelo QUAIDS arrojan demandas inelásticas para los bienes energéticos, siendo la demanda de combustible la más inelástica. Waleed & Mirza (2020) se enfocan en la transición de combustibles de los hogares en Paquistán, para lo cual estiman las elasticidades de demanda de productos energéticos a través de un modelo QUAIDS. Los autores concluyen que la demanda de leña y kerosene son más inelásticas en zonas rurales, mientras que la demanda de los combustibles más limpios es más inelástica en zonas urbanas.

Recientemente, algunos estudios usan un enfoque top-down al combinar modelos insumo-producto y estimación de sistemas de demanda para evaluar el impacto de políticas climáticas sobre los hogares. Moz-Christofoletti & Pereda (2021a) estiman los efectos en bienestar económico y emisiones provocados por impuestos energéticos en Brasil. Los autores utilizan los datos reportados por la Encuesta Brasileña de Presupuestos Familiares para el periodo 2008-2009, obteniendo estimaciones de las elasticidades ingreso y elasticidades precio a través de un modelo QUAIDS censurado. Luego, los cambios en los precios inducidos por impuestos a la energía se determinan a través de un modelo insumo-producto. Los resultados de las elasticidades ingreso indican que los combustibles derivados del petróleo son bienes de lujo, mientras que el carbón y electricidad son bienes necesarios. También, se obtienen demandas inelásticas para la electricidad, gas y gasolina, reflejando que modificaciones en los precios no afectarían mucho el consumo de estos bienes. Finalmente, al combinar los cambios en los precios inducidos por los impuestos energéticos y las elasticidades de demanda se determinan que la mayor parte de la reducción de emisiones es generada por los hogares ricos. Moz-Christofoletti & Pereda (2021b) calculan la huella de carbono del sector residencial de Brasil y los impactos distributivos inducidos por un impuesto al carbono. Para lo anterior, los autores combinan las estimaciones de elasticidades ingreso y precio de un modelo QUAIDS censurado con las simulaciones de un modelo insumo-producto. Los hallazgos indican que las demandas por productos con alto contenido de carbono son inelásticas. Además, se concluye que un impuesto de USD 40/ton CO₂ reduciría las emisiones totales de los hogares en apenas un 2% y generaría una pérdida en bienestar de USD 237 millones. Renner et al. (2018) analizan los efectos de impuestos ambientales en los hogares de México. Los autores estiman un modelo QUAIDS censurado para estimar las elasticidades ingreso y precio que son combinadas con las simulaciones de un modelo insumo-producto extendido ambientalmente. El estudio utiliza los datos de la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares del año 2014, enfocándose en el gasto de electricidad, productos derivados del petróleo, gas natural, transporte público, comida y otros bienes. Las estimaciones de las elasticidades ingreso indican que los hogares perciben el combustible como un bien de lujo, mientras que la electricidad, gas y transporte público como bienes necesarios. Las demandas son inelásticas a cambios en los precios, exceptuando la electricidad y combustibles. En consecuencia, las simulaciones reflejan que un impuesto a los combustibles provocaría la mayor reducción de emisiones de CO₂, seguido por un impuesto a la electricidad. Sorpresivamente, un impuesto exclusivo al gas o al transporte público no serían efectivos para reducir emisiones. Estos tres estudios dejan en evidencia la posibilidad de evaluar los efectos de impuestos al carbono en el sector residencial de Costa Rica a través de un enfoque top-down.

2.4. Aplicaciones empíricas para Costa Rica

La literatura sobre el sector energético y estimación de sistemas de demanda en Costa Rica es muy escasa. En cuanto a la aplicación reciente de modelos energéticos enfocados en el sector residencial se puede mencionar el trabajo de Capitán et al. (2021) en el cual se analizan

los efectos provocados por la estrategia Time-Varing Pricing sobre el consumo residencial de electricidad entre los años 2011 y 2015. Esta estrategia les permite a los autores simular un horario de consumo que minimiza el costo de la electricidad para los hogares de Costa Rica. Goldstein et al. (2021) usan un enfoque bottom-up a través del modelo TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System) para analizar escenarios energéticos y de descarbonización conformes con la Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC por sus siglas en inglés). La comparación de escenarios les permitió a los autores estimar un incremento del consumo de electricidad del 18% para el año 2050 bajo las restricciones necesarias para cumplir los objetivos de la NDC. En relación con la estimación de sistemas de demanda, Dal et al. (2022) estiman un modelo QUAIDS para obtener las elasticidades precio de las principales categorías de alimentos, los datos utilizados provienen de la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares de Costa Rica del año 2018. Con respecto a literatura empírica asociada a modelos input-output en el ámbito energético residencial, esta es nula según la revisión llevada a cabo para este estudio. Sin embargo, algunos estudios previos examinan la elaboración de matrices insumo-producto en Costa Rica (Bulmer-Thomas, 1978; Vargas et al., 2007).

3. Metodología

3.1. Teoría del consumidor

La ciencia económica trata de explicar el comportamiento de los consumidores asumiendo que estos eligen la mejor cesta de bienes que se encuentra a su alcance. Según Jehle & Reny (2011), tres conceptos importantes conforman la teoría del consumidor (restricción presupuestaria, preferencias y utilidad). La restricción presupuestaria se refiere a la cantidad de dinero que un consumidor tiene disponible para gastar en los bienes que conforman las cestas de consumo, el presupuesto disponible o ingreso se denota con la letra w . Las preferencias permiten que la teoría del consumidor adopte un punto de vista matemático en vez de un punto de vista filosófico, específicamente se asume que las preferencias son completas, reflexivas y transitivas. Finalmente, la función de utilidad representa las preferencias del consumidor, asignando valores a todas las cestas de consumo posibles de tal forma que las cestas más preferidas tengan un número mayor que las cestas menos preferidas. La notación más conocida para la función de utilidad es $u(x)$ donde x denota el vector que representa la cesta de bienes. A mayor nivel de utilidad mayor es la satisfacción del consumidor, por lo cual la teoría asume que el consumidor busca maximizar la función de utilidad sujeta a su restricción de presupuesto. Lo anterior, se conoce como el problema de maximización de utilidad, expresándose de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 & \text{Max } u(x) \\
 & x \geq 0 \\
 & \text{s. a. } p \cdot x \leq w
 \end{aligned} \tag{1}$$

En donde, p representa el vector de los precios de los bienes que componen la cesta de consumo. Si existe una única combinación maximizadora de utilidad para precios e ingreso dados, entonces la expresión que resuelve (1) para cada bien en el vector x es conocida como función de la demanda marshalliana⁷ o demanda no compensada. La función de demanda marshalliana relaciona la cantidad consumida de un determinado bien i con respecto a todos los precios e ingreso $x_i(p, w)$. El conjunto de vectores de consumo óptimos en el problema de maximización de utilidad para distintos valores de precios e ingreso se denota como $x^* \in x(p, w)$. Finalmente, el valor de la utilidad evaluada en los niveles de consumo óptimos $u(x^*)$ se denota como $v(p, w)$ y recibe el nombre de función de utilidad indirecta.

Existe un enfoque complementario al problema de maximización de utilidad conocido como el problema de minimización del gasto, el cual determina el nivel de gasto mínimo requerido para alcanzar un cierto nivel de utilidad u . Este enfoque se puede expresar de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } p \cdot x \\
 & x \geq 0 \\
 & \text{s. a. } u(x) \geq u
 \end{aligned} \tag{2}$$

En este enfoque, el consumidor tiene que escoger la cesta de bienes que le permita mantener un cierto nivel de utilidad dado los precios de todos los bienes. La expresión que resuelve (2) para cada bien en el vector x es conocida como función de demanda hicksiana⁸ o demanda compensada. La función de demanda hicksiana relaciona la cantidad consumida de un determinado bien i con respecto a los precios y nivel de utilidad $h_i(p, u)$. El conjunto de vectores de consumo óptimos en el problema de minimización del gasto para distintos valores de precios y utilidad se denota como $h^* \in h(p, u)$. Finalmente, el valor del problema de minimización del gasto en los niveles óptimos de consumo se denota como $e(p, u)$ y recibe el nombre de función de gasto indirecto.

Cabe destacar que la elección que realiza el consumidor cuando resuelve el problema de maximización de la utilidad se basa en información observable (precios e ingreso), mientras que no hay manera de poder identificar valores numéricos para el nivel de utilidad (u) en la restricción mostrada en (2) si el investigador no conoce dicha función.

Deaton & Muellbauer (1980b) destacan que la función de demanda hicksiana para el bien i -ésimo $h_i(p, u)$ debe cumplir con las siguientes propiedades:

⁷ En honor al economista Alfred Marshall.

⁸ La función obtiene su nombre del economista John Hicks.

- Simetría: Las derivadas precio cruzadas son simétricas $\forall i \neq j$ ⁹:

$$\frac{\partial h_i(p, u)}{\partial p_j} = \frac{\partial h_j(p, u)}{\partial p_i} \quad (3)$$

- Negatividad: La derivada con respecto al precio del bien i es negativa o cero:

$$\frac{\partial h_i(p, u)}{\partial p_i} \leq 0 \quad (4)$$

Mas-Colell et al. (1995) indican que las funciones de demanda en su forma marshalliana o hicksiana se pueden relacionar de la siguiente manera:

$$h(p, u) = x(p, e(p, u)) \quad \text{y} \quad x(p, w) = h(p, v(p, w)) \quad (5)$$

La primera relación en (5) explica el uso del término “demanda compensada” para la demanda hicksiana $h(p, u)$ ya que el presupuesto del consumidor debe ser ajustado para poder mantener el nivel de utilidad u ante un cambio en los precios. Por ejemplo, si la situación inicial de un consumidor es descrita por p y w , y los precios cambian a p' , entonces el monto que compensa la pérdida en el presupuesto es $e(p', u) - w$. En otras palabras, la demanda hicksiana fija el nivel de utilidad al mismo tiempo que permite variaciones en el precio, mientras que la demanda marshalliana mantiene el presupuesto fijo al mismo tiempo que permite que el nivel de utilidad varíe. Por lo anterior, la demanda hicksiana entrega estimaciones precisas del cambio en el bienestar cuando varían los precios a diferencia de la demanda marshalliana que entrega solo una aproximación.

La relación expresada en (5) también refleja una fuerte conexión entre las propiedades de la demanda hicksiana y demanda marshalliana, las cuales son descritas a continuación. La propiedad de adición señala que el valor total de las demandas hicksianas y marshallianas es igual al presupuesto disponible: $x(p, w) \cdot p = h(p, u) \cdot p = w$. La propiedad de homogeneidad establece que las demandas hicksianas son homogéneas de grado cero en precios, mientras que las demandas marshallianas son homogéneas de grado uno en ingreso y precios. Lo anterior, implica que para cualquier escalar $\theta > 0$ se cumple que $h(\theta p, u) = h(p, u) = x(\theta p, \theta w) = x(p, w)$. Existe una relación adicional que surge por las propiedades de simetría y negatividad de las demandas hicksianas. Específicamente, la ecuación de Slutsky plantea que las derivadas de la demanda marshalliana y hicksiana se relacionan de la siguiente manera:

⁹ $i, j = 1, \dots, N$, con N la cantidad de bienes incluida en la cesta de consumo.

$$\frac{\partial x_i(p, w)}{\partial p_j} = \frac{\partial h_i(p, u)}{\partial p_j} - x_j(p, w) \cdot \frac{\partial x_i(p, w)}{\partial w} \quad (6)$$

La expresión anterior se puede multiplicar por el precio del bien j (p_j) y dividir por $x_i(p, w)$ para representar la ecuación de Slutsky en términos de elasticidades:

$$\varepsilon_{ij}^M = \varepsilon_{ij}^H - q_j \cdot \eta_i \quad (7)$$

En la expresión (7), ε_{ij}^M representa la elasticidad precio cruzada entre el bien i y el bien j de la demanda marshalliana ($\frac{\partial x_i(p, u)}{\partial p_j} \cdot \frac{p_j}{x_i(p, u)}$), ε_{ij}^H representa la elasticidad precio cruzada entre el bien i y el bien j de la demanda hicksiana ($\frac{\partial x_i(p, u)}{\partial p_j} \cdot \frac{p_j}{x_i(p, u)}$), η_i representa la elasticidad ingreso del bien i ($\frac{\partial x_i(p, w)}{\partial w} \cdot \frac{w}{x_i(p, u)}$) y q_j es la fracción del presupuesto destinado al bien j ($\frac{p_j x_j}{w}$).

Las propiedades anteriores implican que las elasticidades precio de las demandas marshallianas deben cumplir ciertas igualdades, las cuales son impuestas como restricciones en la estimación del sistema de demanda de bienes (Deaton & Muellbauer, 1980b):

$$\sum_j q_j \cdot \varepsilon_j^M = 1 \quad (8)$$

$$\sum_j q_j \cdot \varepsilon_{ij}^M + q_i = 0 \quad (9)$$

$$\sum_j \varepsilon_{ij}^M + \varepsilon_i^M = 0 \quad (10)$$

3.2. Estimación de sistemas de demanda

Las personas consumen cientos o miles de bienes distintos lo que vuelve muy compleja la estimación de los sistemas de demanda. Por ello, en las aplicaciones empíricas se recurre a la agrupación de bienes en categorías para simplificar este problema. Por otra parte, las funciones de demanda son desconocidas para el investigador, por lo cual se asumen formas funcionales que son estimadas por métodos econométricos. Aunque la teoría económica no

indica la mejor forma funcional a emplear para la estimación del sistema de demanda, sí establece un conjunto de propiedades que debería cumplir y que fueron discutidas en la sección 3.1. Deaton & Muellbauer (1980a) elaboraron un modelo para la estimación de sistemas de demanda ampliamente utilizado en la literatura empírica, conocido como Sistema de Demanda Casi Ideal (AIDS por sus siglas en inglés). Este modelo resuelve los problemas de la forma funcional y cumple con las diversas propiedades establecidas por la teoría del consumidor. Siguiendo a Poi (2012), el modelo AIDS considera la demanda por un conjunto de N bienes, para los cuales el consumidor tiene un presupuesto w . El conjunto de bienes N puede ser representado por categorías de bienes, tales como, vivienda, vestimenta, alimentos, etc. Este modelo econométrico posee la siguiente forma funcional:

$$q_i = \alpha_i + \sum_{j=1}^N \gamma_{ij} \cdot \ln p_j + \beta_i \cdot \ln \left\{ \frac{w}{a(P)} \right\}, \quad i = 1, \dots, N \quad (11)$$

Donde:

- Los subíndices i y j representan bienes pertenecientes a la cesta de consumo.
- q_i es la fracción de presupuesto ($\frac{p_i x_i}{w}$) destinado al bien i .
- p_j es el precio del bien $j = 1, \dots, N$.
- α_i , β_i y γ_{ij} son los parámetros que serán estimados con el modelo econométrico.
- w es el gasto total (ingreso) de los hogares.

La variable P corresponde a un índice de precios que se obtiene con la siguiente función:

$$\ln a(P) = \alpha_0 + \sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot \ln p_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \gamma_{ij} \cdot \ln p_i \cdot \ln p_j \quad (12)$$

Como alternativa a esta función no lineal, Deaton & Muellbauer (1980a) proponen una aproximación lineal (LA-AIDS), en la cual el índice de precios P es remplazado por el índice de precios propuesto por Stone (1954):

$$\ln a(P^*) \approx \sum_{j=1}^N q_j \cdot \ln p_j \quad (13)$$

El modelo AIDS requiere el cumplimiento de tres restricciones para satisfacer las propiedades de las funciones de demanda mencionadas en la sección 3.1. Estas restricciones son las siguientes:

- Restricción de adición:

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i = 1; \sum_{i=1}^N \gamma_{ij} = 0; \sum_{i=1}^N \beta_i = 0 \quad (14)$$

- Restricción de homogeneidad:

$$\sum_{j=1}^N \gamma_{ij} = 0 \quad (15)$$

- Restricción de simetría:

$$\gamma_{ij} = \gamma_{ji} \quad \forall i \neq j \quad (16)$$

Las condiciones (14) y (15) son restricciones lineales que pueden ser testeadas con técnicas estándares de inferencia estadística, mientras que la condición (16) es impuesta en el modelo por lo que no puede ser testada.

Pollak & Wales (1981) introducen variables demográficas (z_k) al sustituir el parámetro α_i en en las ecuaciones (11) y (12) por el parámetro α_i^* definido en la ecuación (17). Estas variables demográficas son usadas para permitir heterogeneidad a nivel de hogar:

$$\alpha_i^* = \alpha_i + \sum_{k=1}^K \delta_{ik} z_k \quad (17)$$

Este procedimiento solamente requiere introducir una restricción adicional en el sistema de ecuaciones ($\sum_k \delta_{ik} = 0, \forall i \in 1, \dots, N$).

La ecuación (11) se puede interpretar como una función de la demanda marshalliana. Así, se puede demostrar que las elasticidades precio del modelo AIDS se definen con la siguiente expresión:

$$\varepsilon_{ij}^{AIDS} = -\delta_{ij} + \frac{1}{q_i} \cdot [\gamma_{ij} - \beta_i \cdot (\alpha_j + \sum_{i=1}^N \gamma_{ij} \cdot \ln p_i)] \quad (18)$$

En donde δ_{ij} es el delta de Kronecker, definido como:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si } i = j \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (19)$$

Y la elasticidad de ingreso para el bien i es:

$$\eta_i^{AIDS} = 1 + \frac{\beta_i}{q_i} \quad (20)$$

El modelo QUAIDS propuesto por Deaton & Muelbauer (1980b) es una extensión del modelo AIDS, el cual se caracteriza por asumir no linealidad en el ingreso y no realizar suposiciones fuertes sobre preferencias de los consumidores que puedan llevar a sesgos en las estimaciones. La forma general del modelo se representa en la siguiente expresión:

$$q_i = \alpha_i + \sum_{j=1}^N \gamma_{ij} \cdot \ln p_j + \beta_i \cdot \ln \left(\frac{w}{a(p)} \right) + \frac{\lambda_i}{b(p)} \cdot \left[\ln \left(\frac{w}{a(p)} \right) \right]^2, i = 1, \dots, N \quad (21)$$

En donde, λ_i es un parámetro adicional que debe ser estimado y $b(p)$ es el agregador Cobb-Douglas de los precios descrito como:

$$b(p) = \prod_{i=1}^N p_i^{\beta_i} \quad (22)$$

En el modelo QUAIDS, las restricciones en (14), (15) y (16) se siguen imponiendo al sistema de ecuaciones y se agrega la siguiente restricción:

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i = 0 \quad (23)$$

La prueba de hipótesis $H_0: \lambda_i = 0 \quad \forall i$ permite anidar el modelo AIDS en el modelo QUAIDS ya que cuando el parámetro $\lambda_i = 0 \quad \forall i$, la expresión (21) se convierte en la forma estándar del modelo AIDS definida en (12).

Las elasticidades para el modelo QUAIDS fueron calculadas por Banks et al. (1997) a través de la primera derivada de la ecuación (21) con respecto a $\ln w$ y $\ln p_j$. La elasticidad ingreso se obtiene a través del término $\eta_i^{QUAIDS} = \mu_i/w_i + 1$, mientras que la elasticidad precio marshalliana (no compensada) se obtiene a través de $\varepsilon_{ij}^{QUAIDS} = \mu_{ij}/w_i - \delta_{ij}$. En donde, μ_i y μ_{ij} se definen como:

$$\mu_i = \beta_i + \frac{2\lambda_i}{b(p)} \cdot \left\{ \ln \left[\frac{w}{a(p)} \right] \right\} \quad (24)$$

$$\mu_{ij} = \gamma_{ij} - \mu_i \cdot \left(\alpha_j + \sum_j \gamma_{ij} \cdot \ln p_j \right) - \frac{\lambda_i \beta_i}{b(p)} \cdot \left\{ \ln \left[\frac{w}{a(p)} \right] \right\}^2 \quad (25)$$

La estimación de los parámetros del modelo AIDS requiere que se especifique un valor para α_0 en la expresión (12). Deaton & Muellbauer (1980b) recomiendan fijar un valor algo menor al $\ln w$ existente en los datos. Por otro lado, la estimación de los parámetros no lineales del modelo AIDS se puede llevar a cabo con el método de máxima verosimilitud (o maximum likelihood estimation en inglés), u otros métodos que impongan o no las restricciones (15) y (16). Si se utiliza la aproximación lineal expresada en (13), entonces la estimación de los parámetros α_i, β_i y γ_{ij} se puede realizar con el método mínimo cuadrados ordinarios (OLS). En el caso del modelo QUAIDS, Lecocq & Robin (2015) mencionan que tanto el método OLS o SUR (seemingly unrelated regressions) son aptos para llevar a cabo las estimaciones de los parámetros. Sin embargo, estos autores aluden a la inconsistencia de ambos métodos, por lo que proponen un método alternativo llamado iterated linear least-squares (ILLS). Finalmente, Caro et al (2021) usan el estimador 2SLS (o two-stage least squares por sus siglas en inglés), logrando resultados mejores a los entregados por el modelo QUAIDS estándar.

3.3. Modelo insumo-producto

El enfoque insumo-producto (o input-output en inglés) separa el sistema económico en distintos sectores productivos para analizar los flujos intersectoriales registrados en una matriz insumo-producto (MIP). En las filas de una MIP se representan los sectores que venden sus productos y en las columnas se representan los sectores que compran insumos (ver Figura 3-1). Una MIP contiene todos los datos requeridos para calibrar un modelo insumo-producto.

Figura 3-1: Estructura de una Matriz insumo-producto

		Sector comprador 1 ... N	Demanda final	Total
Sector Vendedor	1 ⋮ N	<i>Consumo intermedio doméstico</i>	<i>Consumo Inversión Gasto del gobierno Exportaciones</i>	<i>Valor bruto de la producción</i>
Importaciones	1 ⋮ N	<i>Consumo intermedio importado</i>		
Remuneraciones Beneficios Impuestos a la producción Subsidios a la producción		<i>Valor agregado</i>		
Total		<i>Valor bruto de la producción</i>		

Fuente: Elaboración propia en base a Mardones & Velásquez (2021)

Un modelo insumo-producto (o modelo de Leontief) consiste en un sistema de ecuaciones lineales que describe la producción de bienes en la economía. Los datos esenciales para calibrar un modelo insumo-producto son los valores monetarios de las transacciones intersectoriales (consumo intermedio doméstico), valor bruto de la producción y demanda final a nivel sectorial. Según Miller & Blair (2009), la lógica que sustenta el modelo de Leontief se puede comprender a través de la siguiente expresión:

$$y_i = z_{i1} + \dots + z_{ij} + \dots + z_{in} + f_i = \sum_{j=1}^N z_{ij} + f_i \quad (26)$$

En donde y_i es la producción bruta total del sector i , f_i es la demanda final del sector i y z_{ij} es el consumo de insumos domésticos que el sector i adquiere del sector j . Así, la ecuación (27) representa los usos intermedios y finales de la producción del sector i . Existe una ecuación similar para cada uno de los N sectores descritos de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} y_1 &= z_{11} + \cdots + z_{1j} + \cdots + z_{1N} + f_1 \\ &\quad \vdots \\ y_N &= z_{N1} + \cdots + z_{Nj} + \cdots + z_{NN} + f_N \end{aligned} \quad (27)$$

El sistema de ecuaciones en (27) se puede representar en notación matricial como:

$$\mathbf{y} = \mathbf{Z} \cdot \mathbf{i} + \mathbf{f} \quad (28)$$

En donde, las variables en formato vectorial y matricial se definen de la siguiente manera¹⁰:

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Z} = \begin{bmatrix} z_{11} & \cdots & z_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{N1} & \cdots & z_{NN} \end{bmatrix} \quad \text{y} \quad \mathbf{f} = \begin{bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_N \end{bmatrix} \quad (29)$$

Los coeficientes técnicos son introducidos en el modelo insumo-producto para establecer funciones de producción lineales. Los coeficientes técnicos se definen como $a_{ij} \equiv z_{ij}/y_j$, describiendo la proporción en la que la producción de un sector requiere insumos de otro sector. Estos coeficientes técnicos se pueden representar en la matriz \mathbf{A} . Así, la ecuación (28) se puede representar como:

$$\mathbf{y} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{y} + \mathbf{f} \quad (30)$$

Al aplicar propiedades de algebra matricial, la producción sectorial se puede expresar a través de la siguiente expresión:

$$\mathbf{y} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{f} \quad (31)$$

¹⁰ \mathbf{i} representa un vector columna de unos con dimensión N .

La ecuación en (31) muestra la forma tradicional del modelo insumo-producto, donde $(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \equiv \mathbf{L}$ es conocida como la matriz inversa de Leontief o matriz de requerimientos totales. Este modelo permite simular el impacto directo e indirecto en la producción causado por un shock de demanda final en el sector i .

Leontief (1970) generó diversas ampliaciones metodológicas a su propio modelo, las cuales desde entonces han sido aplicadas y extendidas para abordar otros problemas. Desde esa época, la extensión ambiental del modelo insumo-producto ha crecido en popularidad como un método que evalúa la relación entre actividades económicas e impactos ambientales (Kitzes, 2013). Según, Miller & Blair (2009), una manera simple de calcular la generación de emisiones asociadas a las actividades productivas es asumir la existencia de un vector de intensidades de emisión \mathbf{g}^{ρ} . Cada elemento del vector (g_i^{ρ}) es la cantidad del contaminante ρ generado por la producción bruta del sector i equivalente a una unidad monetaria. De esta forma, el nivel de contaminación asociado a un vector de producción puede ser expresado como:

$$\mathbf{E}^{\rho} = \mathbf{g}^{\rho} \cdot \mathbf{y} \quad (32)$$

Donde \mathbf{E}^{ρ} es el vector de niveles de contaminación a nivel sectorial. Volviendo a la ecuación (31) se puede calcular \mathbf{E}^{ρ} como una función que depende de la matriz inversa de Leontief y el vector de demanda final. Así, la ecuación (33) permite calcular la contaminación generada de forma directa e indirecta ante un shock de la demanda final en cualquier sector económico:

$$\mathbf{E}^{\rho} = [\mathbf{g}^{\rho} \cdot (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}] \cdot \mathbf{f} \quad (33)$$

3.4. Modelo de precios de Leontief

El modelo de precios de Leontief permite simular shocks de oferta a partir de las condiciones estructurales de la economía. Sin embargo, este modelo no considera las condiciones de equilibrio entre oferta y demanda ya que asume que los sectores determinan sus precios exclusivamente en función de sus costos (Mardones & Baeza, 2018). El modelo de precios de Leontief se puede obtener algebraicamente a través de la definición del valor bruto de la producción que es igual a la suma de los insumos domésticos comprados por el sector j ($\sum_{i=1}^N z_{ij}$) y la suma del valor agregado e importaciones del sector j (b_j), tal como se describe a continuación:

$$y_j = \sum_{i=1}^N z_{ij} + b_j \quad (34)$$

La ecuación (34) en forma matricial adopta la siguiente forma:

$$\mathbf{y}' = \mathbf{i}' \cdot \mathbf{Z} + \mathbf{b}' \quad (35)$$

Donde $\mathbf{b}' = [b_1, \dots, b_N]$ es el vector de valor agregado más importaciones en cada sector económico. Reemplazando $\mathbf{Z} \equiv \mathbf{A}\mathbf{y}$ y multiplicando por \mathbf{y}^{-1} obtenemos la siguiente expresión:

$$\mathbf{i}' = \mathbf{i}' \cdot \mathbf{A} + \mathbf{v}' \quad (36)$$

Con $\mathbf{v}' = [b_1/y_1, \dots, b_N/y_N]$. La parte derecha de (36) representa el costo de los insumos por unidad de producción. Denotando el vector de los precios como \mathbf{p}' y asumiendo que estos precios están normalizados a uno, entonces el modelo de precios de Leontief se define como:

$$\mathbf{p}' = \mathbf{p}' \cdot \mathbf{A} + \mathbf{v}' \quad (37)$$

Aplicando algunas propiedades de algebra matricial se puede llegar a la expresión clásica del modelo precios de Leontief:

$$\mathbf{p} = (\mathbf{I} - \mathbf{A}')^{-1} \cdot \mathbf{v} \quad (38)$$

La extensión ambiental del modelo de precios de Leontief se describe en Mardones & Mena (2020). Específicamente, estos autores describen el efecto en los precios de introducir un impuesto ambiental a la estructura de costos del sector j . Lo anterior, requiere determinar la intensidad de las emisiones directas a nivel sectorial (g_j^p) del contaminante ρ . En el caso de este estudio, la intensidad de emisiones se obtiene al dividir las emisiones directas de CO₂ del sector j y el valor bruto de la producción del sector j . Luego, se calcula el shock de costos causado por un impuesto ambiental que modifica el vector \mathbf{v} en la magnitud de la tasa impositiva (θ) por la intensidad de emisiones de cada sector ($\mathbf{v}^p = \mathbf{v} + \theta \cdot \mathbf{g}^p$). Finalmente, el shock de costos causado por el impuesto a las emisiones modifica el vector de precios sectoriales de la economía (\mathbf{p}^p), tal como se muestra en la siguiente expresión:

$$\mathbf{p}^p = (\mathbf{I} - \mathbf{A}')^{-1} \cdot \mathbf{v}^p \quad (39)$$

Los cambios inducidos por el impuesto a las emisiones sectoriales también se reflejan en la producción y_j debido a la variación en la cantidad demandada de bienes y servicios finales f_j . Este último efecto se puede estimar a través de las elasticidades precio propias de la demanda de cada sector ($\varepsilon_j \equiv \varepsilon_{jj}^{QUAIDS}$), representadas en el vector $\boldsymbol{\varepsilon}$. Así, la variación porcentual en la producción causada por un impuesto a las emisiones en formato matricial es:

$$\Delta\% \mathbf{y}^p \equiv (\mathbf{y}^p - \mathbf{y}) \cdot \mathbf{y}^{-1} = (\mathbf{f} \cdot \mathbf{y}^{-1}) \cdot \boldsymbol{\varepsilon} \cdot (\mathbf{p}^p - \mathbf{p}) \cdot \mathbf{p}^{-1} \quad (40)$$

Finalmente, dado que se asume que las emisiones sectoriales se encuentran directamente conectadas a los niveles de producción, es posible aproximar los cambios en emisiones sectoriales después de un impuesto con la siguiente expresión:

$$\Delta\% \mathbf{E}^p \equiv (\mathbf{E}^p - \mathbf{E}) \cdot \mathbf{E}^{-1} = (\mathbf{y}^p \cdot \mathbf{g}^p - \mathbf{y} \cdot \mathbf{g}^p) \cdot (\mathbf{y} \cdot \mathbf{g}^p)^{-1} \quad (41)$$

Donde \mathbf{y} e \mathbf{y}^p corresponde al vector de producción sectorial antes y después del impuesto, \mathbf{E} y \mathbf{E}^p corresponde al vector de emisión sectorial antes y después del impuesto, mientras que \mathbf{g}^p corresponde al vector de intensidad de emisiones de los sectores económicos.

3.5. Descripción de los datos disponibles

En este estudio se utiliza la Matriz Insumo-Producto (MIP) de Costa Rica para el año 2017, la cual fue publicada por el Banco Central de Costa Rica. La MIP se encuentra compuesta por 184 productos y describe los flujos monetarios en millones de colones. Sin embargo, los datos fueron agrupados en 20 sectores económicos para facilitar el enfoque top-down que debe vincular el modelo intersectorial y el sistema de demanda de bienes. El detalle de agregación sectorial en la MIP se presenta en la Tabla A-1 del Anexo. La elección de los sectores se basa en mantener una alta desagregación de bienes energéticos, y también, representar los grupos de bienes y servicios con mayor proporción de gasto total de los hogares según la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos del Hogar 2018 (ENIGH 2018-2019) publicada por el Instituto Nacional de Estadística de Costa Rica. Específicamente, los grupos de bienes y servicios considerados para la estimación del sistema de demanda

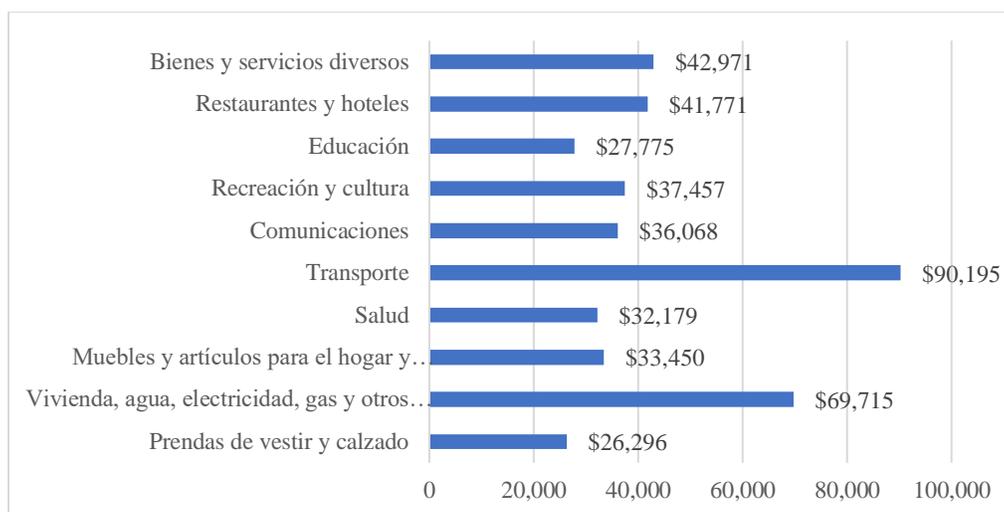
incluyen Alimentos, Electricidad, Gas Licuado, Leña, Carbón, Gasolina, Diésel, Transporte público y Resto de bienes y servicios. La encuesta ENIGH 2018-2019 proporciona datos económicos de 7.046 hogares y es representativa de 1,54 millones de hogares. Según los datos disponibles en la encuesta se determina que el ingreso promedio por hogar es \$1.142.697 colones, el gasto en consumo por hogar es \$579.148 colones y el tamaño promedio del hogar es 3,2 personas. La estadística descriptiva de los porcentajes de gastos en los grupos de bienes y servicios incluidos en el estudio y sus respectivos precios se resume en la Tabla 3-1, observándose que las principales categorías del gasto mensual de los hogares costarricenses se enfocan en “Alimentos”, “Resto de bienes y servicios”, “Electricidad” y “Transporte público”.

Tabla 3-1: Estadísticas descriptivas de gasto porcentual total y precio de bienes y servicios de los hogares en colones (₡)

Grupo de bienes y servicios	Gasto porcentual total (w_i)		Precio (p_i)	
	Promedio	Desv. Est.	Promedio	Desv. Est.
Alimentos	0,4286	0,0985	1,6331	0,7648
Electricidad	0,0804	0,0637	3595,53	5401,73
Gas Licuado	0,0169	0,0246	504,4061	811,8065
Leña	0,0014	0,0146	9355,419	2560,035
Carbón	0,0010	0,0018	1794,494	65,5364
Gasolina	0,0075	0,1237	12221,67	5848,709
Diésel	0,0075	0,0456	16946,38	2242,924
Transporte Público	0,0614	0,0974	4171,015	18714,62
Resto de bienes y servicios	0,3319	0,0859	1,4340	0,7528

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de ENIGH 2018. Nota: Los precios se expresan en colones.

En la Figura 3-2 se presenta el gasto promedio mensual con un mayor nivel de desagregación que puede contribuir a entender el comportamiento de consumo de los hogares en Costa Rica. Sin embargo, esta desagregación no fue utilizada ya que no se enfocaba en los sectores económicos intensivos en emisiones de CO₂, limitando el emparejamiento de modelos en el enfoque top-down.

Figura 3-1: Promedio del gasto mensual según categorías de bienes

Fuente: ENIGH 2018-2019.

Los datos de las emisiones sectoriales de CO₂ están disponibles en el Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero¹¹ publicado por el Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica. Sin embargo, este inventario sigue las directrices del IPCC para agrupar las emisiones sectoriales de CO₂ equivalente (CO₂eq), la cual está demasiado agregada y no coincide con la desagregación sectorial utilizada en el presente estudio. Además, el inventario está focalizado en las emisiones de CO₂eq, por lo cual las estimaciones de CO₂ son escasas. Por lo anterior, se utiliza un método indirecto para obtener las emisiones sectoriales en Costa Rica con el nivel de desagregación requerido. Específicamente, las emisiones de CO₂ de cada sector son estimadas a través del gasto en combustibles, el cual se encuentra disponible en el cuadro de consumo intermedio doméstico e importado de la MIP. En particular, los gastos sectoriales en combustibles fósiles (gasolina, diésel, fuel oil, kerosene y carbón) se dividen por el tipo de cambio¹² (USD/colon) y sus respectivos precios promedio para el año 2017¹³ (ver Tabla 3-2) con el objetivo de obtener las unidades físicas de combustibles utilizadas por cada sector económico. Luego, las unidades físicas de cada combustible son multiplicadas por su respectivo factor de emisión de CO₂, obteniendo el valor anual de las toneladas emitidas de CO₂ en cada sector económico. La siguiente expresión muestra la fórmula implementada para el cálculo mencionado:

¹¹<https://cambioclimatico.go.cr/inventario-nacional-de-gases-de-efecto-invernadero-ingei/#:~:text=Un%20Inventario%20de%20Nacional%20de,un%20pa%C3%ADs%20en%20un%20a%C3%B1o.>

¹² Según los datos del Banco Central de Costa Rica, el precio promedio del dólar en 2017 fue de 562,90 colones.

¹³ Los precios de cada combustible fueron obtenidos de la Administración de Información Energética de Estados Unidos (U.S. Energy Information Administration EIA, <https://www.eia.gov/>) y equivalen a un promedio anual.

$$g_j^p = \frac{Z_{j,gasolina}}{P_{gasolina}} \cdot T_{gasolina} + \frac{Z_{j,diésel}}{P_{diésel}} \cdot T_{diésel} + \frac{Z_{j,fueloil}}{P_{fueloil}} \cdot T_{fuel} + \frac{Z_{j,kerosene}}{P_{kerosene}} \cdot T_{kerosene} + \frac{Z_{j,carbón}}{P_{carbón}} \cdot T_{carbón} \quad (42)$$

Donde:

- g_j^p son las toneladas de CO₂ emitidas por la producción del sector j .
- $Z_{j,gasolina}$ es el gasto total en gasolina del sector j .
- $Z_{j,diésel}$ es el gasto total en diésel del sector j .
- $Z_{j,fueloil}$ es el gasto total en fuel oil del sector j .
- $Z_{j,kerosene}$ es el gasto total en kerosene del sector j .
- $Z_{j,carbón}$ es el gasto total en carbón del sector j .
- $P_{gasolina}, P_{diésel}, P_{fueloil}, P_{kerosene}$ y $P_{carbón}$ corresponden a los precios en la respectiva unidad de medida para gasolina, diésel, fuel oil, kerosene y carbón, respectivamente.
- $T_{gasolina}, T_{diésel}, T_{fueloil}, T_{kerosene}$ y $T_{carbón}$ corresponden a la cantidad de CO₂ emitido por unidad de combustible (ton CO₂/unidad de medida) de la gasolina, diésel, fuel oil, kerosene y carbón respectivamente.

Tabla 3-2: Datos utilizados para el cálculo de emisiones sectoriales

Combustible	Precio (USD/Unidad de medida)	Unidad de medida	Factor de emisión (kg de CO ₂ /Unidad de medida)
Gasolina	2,41	Galón	8,78
Diésel	2,65	Galón	10,21
Fuel oil	0,991	Galón	11,27
Kerosene	1,36	Galón	9,88
Carbón	50,05	Short ton	1827,04

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de www.eia.gov.

Cabe señalar que este método asume que los combustibles fósiles comprados por los sectores se utilizan por completo dentro del periodo de tiempo estudiado.

3.6. Estimación de emisiones sectoriales de CO₂

En este estudio se requieren las emisiones de CO₂ con la misma desagregación sectorial usada en el modelo de precios de Leontief. Sin embargo, el Inventario Nacional de GEI de Costa Rica no presenta la desagregación sectorial requerida. Por lo anterior, se decidió estimar las emisiones sectoriales de forma indirecta a través del gasto en combustibles fósiles realizado

por cada uno de los sectores económicos durante el año 2017. La intención original fue obtener estos gastos en combustibles de la MIP disponible en la página del Banco Central de Costa Rica. No obstante, los flujos intersectoriales de gasolina, diésel, fuel oil, kerosene y carbón no se encontraban desagregados en la MIP, por lo que se tuvo que recurrir al Cuadro de Oferta y Utilización (COU) 2017 para reconstruir esas transacciones a nivel de combustibles fósiles. Específicamente, se estimaron las emisiones de CO₂ liberadas por el consumo de gasolina, diésel, fueloil, kerosene y carbón. Según datos oficiales del Banco Mundial, se emitieron 8.260.000 toneladas de CO₂ equivalente en Costa Rica durante el año 2017, mientras que el valor estimado de las emisiones con el método indirecto basado en el uso de combustibles fue 7.130.915 toneladas de CO₂. Una parte de la diferencia se explica porque las emisiones de CO₂ equivalente incluyen otros gases de efecto invernadero aparte del CO₂. Otra parte de esta diferencia se debe a que el método aplicado solamente considera el consumo de productos derivados del petróleo y carbón, pero no considera la quema de biomasa, incineración y quema abierta de residuos, oxidación de lubricantes para automóviles o incluso la manufactura de combustibles sólidos. La Tabla 3-3 reporta el gasto en combustibles fósiles de cada sector económico (en millones de colones) y sus respectivas emisiones de CO₂ en toneladas. Los sectores “Transporte de pasajeros”, “Resto de Transporte” y “Servicios” presentan las mayores emisiones de CO₂. En particular, las emisiones de los sectores relacionados con el transporte representan casi el 40% de las emisiones totales¹⁴. Los sectores “Agropecuario” e “Industria del Alimento” emiten 650.409 y 603.315 toneladas respectivamente, lo cual se explica por los gastos en gasolina y diésel destinados a la producción y distribución de productos. Las emisiones más bajas corresponden a los sectores “Silvicultura”, “Textil y cuero” y “Fuel oil” con emisiones que alcanzan los montos de 2.692, 6.337 y 1.984 toneladas de CO₂, respectivamente. Finalmente, se puede apreciar un bajo consumo de carbón mineral en todos los sectores que componen la economía costarricense.

¹⁴ El sector “Resto de Transporte” incluye el transporte de carga por vías marítimas y terrestres, y también, los servicios asociados al transporte, mientras que el sector “Transporte de pasajeros” incluye el transporte de buses, taxis, vuelos comerciales, entre otros.

Tabla 3-3: Consumo sectorial de combustibles fósiles y estimación de emisiones de CO₂

Sector	Gasolina	Diesel	Fuel oil	Kerosene	Carbón	Emisiones de CO ₂ (toneladas)
	Millones de colones					
Agropecuario	46.332	45.686	558	707	7	650.409
Silvicultura	309	91	0	0	0	2.692
Pesca	526	5.646	0	24	0	43.510
Minería	5.279	14.502	1.218	967	10	175.703
Industria de alimentos	7.859	25.236	14.530	5.206	55	603.315
Textil y cuero	340	306	59	51	1	6.337
Madera y papel	1.248	2.445	1.558	600	6	66.139
Gasolina	574	1.125	717	276	3	30.424
Diésel	524	1.027	654	252	3	27.778
Fuel oil	37	73	47	18	0	1.984
Kerosene y carbón	125	245	156	60	1	6.614
Industria de la química y plástica	2.713	1.047	181	2.619	28	65.501
Resto de industrias	5.984	9.769	5.753	25.963	274	588.314
Energía eléctrica	2.539	1.846	1.790	46	0	67.634
Agua	2.206	7.061	0	61	1	65.132
Construcción	12.540	49.849	1.067	160	2	458.039
Comercio	28.580	16.417	4.749	2.467	26	438.110
Transporte de pasajeros	86.573	127.897	3	44	0	1.474.940
Resto de transporte	28.857	128.634	0	194	2	1.098.575
Servicios	86.949	51.230	317	22.703	239	1.259.765
Total	320.093	490.131	33.357	62.419	658	7.130.916

Fuente: Elaboración propia.

3.7. Vinculación de modelos a través del enfoque top-down

Este estudio busca determinar los efectos causados por los impuestos a las emisiones de CO₂ en Costa Rica. Específicamente, las tasas impositivas simuladas son 25, 50, 75 y 100 dólares por tonelada de dióxido de carbono emitida (USD/ton CO₂). Para lo anterior, se sigue un enfoque top-down similar al utilizado por Moz-Christofolletti & Pereda (2021b). Específicamente, se establece un vínculo entre un modelo intersectorial (modelo precios de Leontief) y un modelo que estima un sistema de demanda (modelo QUAIDS) a través de la siguiente secuencia de pasos. Primero, se usa la ecuación (42) para calcular las emisiones de

CO₂ de cada sector económico a partir del gasto en combustibles fósiles y factores de emisión. Luego, se utiliza la extensión ambiental del modelo de precios de Leontief representada en la ecuación (39) para obtener el impacto en los precios causado por un impuesto al CO₂. Por otro lado, se estiman las elasticidades de demanda de los grupos de bienes consumidos por los hogares de Costa Rica a través de los modelos AIDS y QUAIDS. Una prueba estadística de Wald permite escoger el modelo más adecuado para los datos de Costa Rica. Finalmente, las elasticidades precio escogidas son utilizadas para determinar el cambio en la demanda final, lo cual a su vez modifica la producción y emisiones sectoriales según las ecuaciones (40) y (41).

4. Resultados

En esta sección se presentan los resultados de los diferentes modelos discutidos en la sección de metodología. Primero, se reportan las elasticidades precio y elasticidades ingreso estimadas con los modelos AIDS y QUAIDS. Luego, se describen las variaciones en los precios causadas por impuestos al CO₂ que fueron obtenidas a través del modelo de precios de Leontief. Posteriormente, se vinculan las variaciones de precios y elasticidades a través de un enfoque top-down para estimar cambios en la demanda final y producción a nivel sectorial. Finalmente, se determina la respuesta de las emisiones de CO₂ a diferentes escenarios impositivos y se discuten recomendaciones para el diseño de las políticas climáticas en Costa Rica.

4.1. Resultados de la estimación de los modelos AIDS y QUAIDS

La Tabla 4-1 muestra las estimaciones de las elasticidades precio propias (compensadas y no compensadas) y elasticidades ingreso para el sistema de demanda de bienes en Costa Rica. Casi todas las elasticidades precio propias muestran el signo negativo esperado, excepto la elasticidad precio de la demanda compensada de “Alimentos”. Según la teoría del consumidor, la elasticidad de precio propia debería ser negativa ya que la cantidad demandada de un bien disminuye cuando su precio aumenta. En contraste, la elasticidad precio cruzada puede ser positiva, negativa o cero si los bienes son sustitutos, complementarios o no relacionados. El detalle con todos los parámetros estimados para el modelo AIDS y QUAIDS se reportan respectivamente en las Tablas B-1 y B-2 del Anexo B.

Los valores de las elasticidades estadísticamente significativas en el modelo AIDS indican que los hogares tienen una demanda inelástica de “Alimentos”, “Electricidad”, “Gasolina” y “Resto de bienes y servicios”, mientras que tienen una demanda elástica de “Gas licuado”, “Leña”, “Diésel” y “Transporte público”. Cabe notar que la demanda de “Diésel” es más elástica al precio que el resto de los combustibles con elasticidades precio estadísticamente significativas. Resultados similares fueron encontrados por estudios empíricos previos. Por

ejemplo, Zabaloy & Viego (2022) encuentran que la demanda de “Electricidad” es inelástica en Latinoamérica, Galindo et al. (2015) determinan que la demanda de “Gasolina” es inelástica en múltiples países latinoamericanos y Moz-Christofolletti & Pereda (2021a) concluyen que las demandas de “Electricidad” y “Gasolina” son inelásticas en Brasil. En el caso de la elasticidad precio (compensada y no compensada) de la demanda de carbón, esta no es estadísticamente significativa, al igual que las elasticidades ingreso de “Electricidad” y “Gas licuado”. Las elasticidades ingreso de “Alimentos”, “Leña”, “Carbón”, “Gasolina”, “Diésel”, “Transporte público” y “Resto de bienes y servicios” son mayores que cero, reflejando que son bienes normales.

Los valores de las elasticidades estadísticamente significativas en el modelo QUAIDS indican que los hogares tienen una demanda inelástica de “Alimentos”, “Electricidad” y “Resto de bienes y servicios”, mientras que tienen una demanda elástica de “Gas licuado”, “Leña”, “Gasolina”, “Diésel” y “Transporte público”. Al igual que en el modelo AIDS, la demanda residencial de “Diésel” es más elástica que la demanda de otros combustibles ya que la elasticidad precio de la demanda de carbón no es estadísticamente significativa. Por otra parte, las elasticidades ingreso de “Alimentos”, “Gasolina”, “Transporte Público” y “Resto de bienes y servicios” son positivas y estadísticamente significativas, reflejando que son bienes normales. Al desagregar los bienes normales en bienes de lujo y necesarios, se concluye que la “Gasolina” y “Transporte Público” son bienes de lujo. Resultados similares fueron encontrados por Díaz & Medlock (2021) quienes señalan que el transporte es un bien de lujo para hogares pobres y hogares no pobres de México, Moz-Christofolletti & Pereda (2021a) afirman que la gasolina y el transporte es un bien de lujo para la clase baja en Brasil, y Renner et al. (2018) indican que la gasolina es un bien de lujo para todas las clases sociales de México. Cabe señalar que la diferencia en elasticidades de ingreso entre ambos modelos se explica por la ausencia o presencia del supuesto sobre no linealidad del ingreso.

Tabla 4-1: Resultados de la estimación de los modelos AIDS y QUAIDS

Grupo de bienes o servicios	AIDS			QUAIDS		
	Elasticidad precio (no compensada)	Elasticidad precio (compensada)	Elasticidad ingreso	Elasticidad precio (no compensada)	Elasticidad precio (compensada)	Elasticidad ingreso
Alimentos	-0,438 *** (0,020)	0,014 * (0,020)	1,053 *** (0,022)	-0,261 *** (0,049)	0,109 (0,034)	0,863 *** (0,039)
Electricidad	-0,949 *** (0,007)	-0,921 *** (0,007)	-0,028 (0,823)	-0,963 *** (0,027)	-0,970 *** (0,019)	-0,082 (0,117)
Gas Licuado	-1,176 *** (0,051)	-1,173 *** (0,051)	0,163 (0,806)	-1,198 *** (0,058)	-1,208 *** (0,056)	-0,572 (0,420)
Leña	-1,464 *** (0,331)	-1,464 *** (0,331)	0,912 *** (0,112)	-1,472 *** (0,327)	-1,474 *** (0,328)	-1,449 (2,497)
Carbón	-5,570 (3,816)	-5,570 (3,816)	1,001 *** (0,011)	-5,659 (3,835)	-5,659 (3,835)	2,142 (1,674)
Gasolina	-0,885 *** (0,048)	-0,806 *** (0,048)	1,047 *** (0,087)	-1,222 *** (0,108)	-1,040 *** (0,116)	2,534 *** (0,178)
Diesel	-2,855 *** (0,493)	-2,841 *** (0,493)	1,054 *** (0,072)	-3,111 *** (0,503)	-3,094 *** (0,504)	2,366 (0,659)
Transporte público	-1,274 *** (0,025)	-1,214 *** (0,025)	0,959 *** (0,263)	-1,041 *** (0,129)	-0,917 *** (0,141)	2,019 *** (0,200)
Resto de bienes y servicios	-0,378 *** (0,024)	-0,014 * (0,024)	1,108 *** (0,061)	-0,335 *** (0,054)	-0,010 *** (0,039)	0,979 *** (0,047)

Fuente: Elaboración propia con datos del modelo AIDS y QUAIDS. Nota: (*) significativo al 5%, (**) significativo al 1% y (***) significativo al 0,1%.

Los resultados de la Tabla 4-1 reflejan que las elasticidades precio propias (compensadas y no compensadas) obtenidas con ambos modelos son relativamente similares y que la mayor diferencia entre modelos se observa en las elasticidades ingreso. Sin embargo, se debe determinar el modelo econométrico más adecuado para este estudio. Una forma de seleccionar el mejor modelo es a través de una prueba de Wald aplicada a los parámetros cuadráticos del modelo QUAIDS, el cual anida al modelo AIDS. En esta prueba estadística, la hipótesis nula es que todos los parámetros λ_i son iguales a cero, la cual en caso de no ser rechazada validaría la utilización del modelo AIDS.

Tabla 4-2: Resultados para prueba de Wald

Hipótesis	Variable
(1)	$\lambda_1 = 0$
(2)	$\lambda_2 = 0$
(3)	$\lambda_3 = 0$
(4)	$\lambda_4 = 0$
(5)	$\lambda_5 = 0$
(6)	$\lambda_6 = 0$
(7)	$\lambda_7 = 0$
(8)	$\lambda_8 = 0$
(9)	$\lambda_9 = 0$
$\chi^2(8) = 3656,23$	
Probabilidad $> \chi^2 = 0,000$	

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la Tabla 4-2 permiten rechazar la hipótesis nula, confirmando una relación no lineal entre los gastos en bienes y el ingreso de los hogares. En consecuencia, las elasticidades precio propias del modelo QUAIDS son escogidas para alimentar al enfoque top-down.

4.2. Resultados del modelo de precios de Leontief

En este estudio se plantearon cuatro escenarios para simular el impacto de los impuestos al carbono sobre los precios. Las tasas impositivas en cada escenario son 25, 50, 75 y 100 USD/ton CO₂, las cuales se aplican a todas las emisiones independientemente del sector económico. La Tabla 4-3 reporta la variación porcentual de los precios sectoriales en los cuatro escenarios respecto a la situación base sin impuestos al carbono.

Tabla 4-3: Variación porcentual de los precios sectoriales según escenario impositivo

Sector	25 USD/ton CO ₂	50 USD/ton CO ₂	75 USD/ton CO ₂	100 USD/ton CO ₂
Agropecuario	0,40%	0,80%	1,20%	1,60%
Silvicultura	0,12%	0,22%	0,34%	0,45%
Pesca	1,31%	2,09%	3,13%	4,17%
Minería	1,44%	2,35%	3,53%	4,70%
Industria de alimentos	0,35%	0,62%	0,93%	1,25%
Industria de textil y cuero	0,14%	0,25%	0,37%	0,49%
Industria de madera y papel	0,37%	0,62%	0,93%	1,24%
Gasolina	0,22%	0,21%	0,32%	0,42%
Diésel	0,22%	0,24%	0,36%	0,48%
Fuel oil	0,22%	0,21%	0,31%	0,41%
Kerosene y carbón	0,22%	0,27%	0,40%	0,53%
Industria química y plástica	0,25%	0,35%	0,53%	0,71%
Resto de industrias	0,30%	0,55%	0,83%	1,10%
Energía eléctrica	0,15%	0,29%	0,43%	0,58%
Agua	0,38%	0,68%	1,03%	1,37%
Construcción	0,40%	0,69%	1,04%	1,39%
Comercio	0,23%	0,44%	0,65%	0,87%
Transporte de pasajeros	1,23%	2,10%	3,15%	4,21%
Resto de transporte	1,22%	2,64%	3,96%	5,28%
Servicios	0,13%	0,25%	0,38%	0,51%

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados reflejan que la introducción de un impuesto al carbono en Costa Rica provocaría alzas leves de precios en la mayoría de los sectores. Por ejemplo, en el escenario con una tasa impositiva de 100 USD/ton CO₂ solamente se alcanzarían aumentos máximos de 4,17%, 4,70%, 4,21% y 5,28% en los sectores “Pesca”, “Minería”, “Transporte de pasajeros” y “Resto de transporte”, respectivamente. Estos mismos sectores presentan las mayores alzas de precios en todos los escenarios planteados ya que el modelo de precios de Leontief es una aproximación lineal de la economía. Es importante destacar que tras analizar los coeficientes técnicos, el incremento en los precios de los sectores “Transporte de pasajeros”, “Resto de transporte”, “Pesca” y “Minería” se asocia directamente al alto consumo de gasolina, diésel, kerosene y carbón mineral.

4.3. Impactos en la producción sectorial según escenario impositivo

La variación porcentual sobre la demanda final sectorial se puede obtener al relacionar los cambios porcentuales en los precios reportados en la Tabla 4-3 y la elasticidad precio propia de las demandas marshallianas estimadas con el modelo QUAIDS. Lo anterior, permite calcular la nueva demanda final sectorial que se observaría en cada escenario impositivo, la cual se asume que modifica la producción sectorial en la misma magnitud (ver Mardones &

Velásquez, 2021). Sin embargo, en el modelo de precios de Leontief existen más sectores económicos que las elasticidades precio propias estimadas con el modelo QUAIDS, por lo cual se debe realizar la asignación de las nueve elasticidades precio propias disponibles a los veinte sectores económicos siguiendo el criterio de similitud de bienes definido en la Tabla C-1 del Anexo C. Es importante notar que las elasticidades precio propias estimadas son reportadas con sus respectivas desviaciones estándar, por lo cual se decidió realizar una simulación Montecarlo para obtener las variaciones en la producción sectorial con intervalos de confianza al 95% (ver Tabla 4-4).

Tabla 4-4: Variación porcentual de la producción sectorial según escenario impositivo

Sector	Producción en escenario base (Millones de colones)	25 USD/ton CO₂	50 USD/ton CO₂	75 USD/ton CO₂	100 USD/ton CO₂
Agropecuario	3.068.386	-0,07% [-0,09%; -0,04%]	-0,13% [-0,18%; -0,08%]	-0,20% [-0,27%; -0,12%]	-0,26% [-0,36%; -0,17%]
Silvicultura	49.571	-0,02% [-0,04%; -0,01%]	-0,05% [-0,07%; -0,03%]	-0,07% [-0,10%; -0,04%]	-0,10% [-0,14%; -0,06%]
Pesca	58.649	-0,07% [-0,09%; -0,04%]	-0,13% [-0,18%; -0,09%]	-0,20% [-0,27%; -0,13%]	-0,27% [-0,37%; -0,17%]
Minería	210.092	-0,02% [-0,02%; -0,01%]	-0,03% [-0,04%; -0,02%]	-0,05% [-0,06%; -0,03%]	-0,06% [-0,08%; -0,04%]
Industria de alimentos	4.923.076	-0,09% [-0,13%; -0,06%]	-0,18% [-0,25%; -0,12%]	-0,28% [-0,38%; -0,17%]	-0,37% [-0,51%; -0,23%]
Industria textil y cuero	227.090	-0,16% [-0,21%; -0,11%]	-0,32% [-0,42%; -0,22%]	-0,48% [-0,63%; -0,34%]	-0,64% [-0,84%; -0,45%]
Industria de madera y papel	630.739	-0,40% [-0,58%; -0,23%]	-0,80% [-1,14%; -0,45%]	-1,20% [-1,74%; -0,69%]	-1,60% [-2,32%; -0,92%]
Gasolina	290.140	-0,28% [-0,33%; -0,23%]	-0,56% [-0,66%; -0,46%]	-0,84% [-0,98%; -0,69%]	-1,12% [-1,39%; -0,98%]
Diésel	264.910	-0,12% [-0,16%; -0,08%]	-0,24% [-0,32%; -0,17%]	-0,36% [-0,49%; -0,25%]	-0,49% [-0,65%; -0,33%]
Fuel oil	18.922	-0,02% [-0,03%; -0,02%]	-0,05% [-0,06%; -0,03%]	-0,07% [-0,10%; -0,05%]	-0,09% [-0,13%; -0,07%]
Kerosene y carbón	63.074	-0,24% [-0,03%; -0,02%]	-0,48% [-1,09%; 0,16%]	-0,71% [-1,61%; 0,23%]	-0,95% [-2,26%; 0,31%]
Industria química y plástica	1.093.143	-0,12% [-0,16%; -0,08%]	-0,25% [-0,33%; -0,17%]	-0,37% [-0,49%; -0,25%]	-0,50% [-0,65%; -0,34%]
Resto de industrias	3.795.100	-0,16% [-0,21%; -0,11%]	-0,33% [-0,43%; -0,22%]	-0,49% [-0,64%; -0,34%]	-0,65% [-0,85%; -0,45%]
Energía eléctrica	1.005.996	-0,05% [-0,05%; -0,05%]	-0,10% [-0,10%; -0,09%]	-0,15% [-0,15%; -0,14%]	-0,20% [-0,21%; -0,18%]
Agua	354.370	-0,08% [-0,10%; -0,05%]	-0,15% [-0,20%; -0,10%]	-0,23% [-0,30%; -0,16%]	-0,30% [-0,40%; -0,21%]
Construcción	4.397.250	-0,09% [-0,12%; -0,06%]	-0,18% [-0,24%; -0,13%]	-0,27% [-0,36%; -0,19%]	-0,36% [-0,48%; -0,25%]
Comercio	4.537.742	-0,06% [-0,07%; -0,04%]	-0,11% [-0,15%; -0,08%]	-0,17% [-0,22%; -0,12%]	-0,22% [-0,30%; -0,16%]
Transporte de pasajeros	1.855.286	-0,98% [-1,22%; -0,73%]	-1,97% [-2,44%; -1,48%]	-2,95% [-3,67%; -2,24%]	-3,94% [-4,90%; -2,99%]
Resto de transporte	1.420.986	-0,42% [-0,52%; -0,32%]	-0,84% [-1,04%; -0,64%]	-1,26% [-1,56%; -0,94%]	-1,67% [-2,07%; -1,25%]
Servicios	27.104.508	-0,03% [-0,04%; -0,02%]	-0,06% [-0,08%; -0,04%]	-0,10% [-0,12%; -0,06%]	-0,13% [-0,16%; -0,08%]

Fuente: Elaboración propia. Nota: En paréntesis se presentan los intervalos de confianza al 95%.

Los resultados de la Tabla 4-4 muestran que la introducción de impuestos al carbono provoca cambios relativamente bajos en los niveles de producción de todos los sectores económicos. Los sectores con mayores variaciones porcentuales en la producción no coinciden con los sectores que tienen las mayores variaciones porcentuales de precios, lo cual se explica por los valores de las elasticidades precio propias. Las mayores disminuciones en la producción se generan en los sectores “Gasolina”, “Industria de madera y papel”, “Resto de transportes” y “Transporte de pasajeros” que registran variaciones de -1,12%, -1,60%, -1,67% y -3,94% respectivamente para un impuesto de 100 USD/ton CO₂. Los sectores menos afectados son “Minería”, “Fuel oil”, “Silvicultura” y “Servicios” con variaciones de -0,06%, -0,09%, -0,10% y -0,13% respectivamente para un impuesto de 100 USD/ton CO₂. La variación porcentual de la producción agregada de toda la economía es -0,11%, -0,21%, -0,32% y -0,42% para los impuestos de 25, 50, 75, y 100 USD/ton CO₂, respectivamente (ver Anexo D).

4.4. Impacto en las emisiones sectoriales según escenario impositivo

La Tabla 4-5 muestra la variación porcentual en las emisiones sectoriales de CO₂ en el escenario base y los cuatro escenarios impositivos simulados. Las variaciones en las emisiones son relativamente bajas ya que las emisiones están directamente relacionadas con la producción sectorial. Los sectores económicos con menor reducción de emisiones son “Fuel oil”, “Silvicultura”, “Industria textil y cuero”, “Kerosene y carbón”, “Minería” y “Pesca”, mientras que los sectores que más disminuyen sus emisiones en orden decreciente son “Transporte de pasajeros”, “Resto de transporte”, “Resto de industrias”, “Industria de alimentos” y “Agropecuario”. La variación porcentual de las emisiones totales es -0,32%, -0,64%, -0,96% y -1,28% para los impuestos de 25, 50, 75 y 100 USD/ton CO₂, respectivamente. Adicionalmente, la simulación Montecarlo permite establecer rangos con un nivel de confianza al 95%. Por ejemplo, las reducciones de emisiones totales pueden variar entre 16.665 y 28.437 toneladas para un impuesto de 25 USD/ton CO₂, entre 33.674 y 57.143 para un impuesto de 50 USD/ton CO₂, entre 50.571 y 85.747 para un impuesto de 75 USD/ton CO₂, y finalmente, entre 67.419 y 114.335 toneladas para un impuesto de 100 USD/ton CO₂. A pesar de que los impuestos simulados son bastante altos en el contexto internacional¹⁵, la reducción de emisiones es muy acotada en Costa Rica. Cabe señalar que según Stiglitz & Stern (2017) los impuestos al carbono consistentes con las metas de temperaturas establecidas en el Acuerdo de París varían entre 40 y 80 USD/ton de CO₂ equivalente al 2020 y entre 50 y 100 USD/ton de CO₂ equivalente al 2030.

Estos resultados evidencian que las políticas climáticas basadas en la introducción de impuestos al carbono no causarían impactos relevantes en las emisiones de CO₂ de Costa Rica. Lo anterior, se explica porque es uno de los países que generan menores emisiones de CO₂ en Latinoamérica¹⁶. Actualmente, el 100% de la energía eléctrica del país proviene de

¹⁵ El impuesto al carbono más alto en el mundo se aplica en Suecia y equivale a aproximadamente USD 130/ton CO₂.

¹⁶ <https://cnnespanol.cnn.com/2017/06/08/estos-son-los-paises-de-america-latina-que-mas-co2-emiten/>

fuentes renovables (29,7% hidroeléctrica, 49,2% geotérmica, 8% solar, eólica y otros, y 13% biomasa, caña de azúcar y derivados)¹⁷. En contraste, otros países limítrofes como Nicaragua y Panamá abastecen solamente el 77,3% y 48,8% de sus redes eléctricas con energías renovables¹⁷. Otra posible explicación es la reputación que tiene el país como destino turístico¹⁸, lo que motivó a las autoridades a priorizar el cuidado del medioambiente tempranamente. En consecuencia, se sugiere concentrar los esfuerzos de las políticas climáticas en el transporte privado, público y de carga. Por ejemplo, se podrían introducir impuestos específicos a los combustibles fósiles, impuestos ambientales a la compra de vehículos más contaminantes, subsidios para la renovación de buses o camiones, y subsidios para electromovilidad del transporte público y privado. Estas iniciativas también podrían contribuir a reducir las emisiones indirectas de los otros sectores económicos. Adicionalmente, se sugiere la posibilidad de aplicar impuestos a las emisiones de otros gases de efecto invernadero provenientes de las actividades ganaderas y agrícolas que no fueron analizadas en este estudio.

¹⁷ <https://hubenergia.org/es/indicadores/generacion-primaria-con-energias-renovables>

¹⁸ <https://www.ict.go.cr/es/noticias-destacadas/1594-costa-rica-entre-los-10-mejores-destinos-del-mundo-seg%C3%BAAn-lonely-planet.html>

Tabla 4-5: Reducción de las emisiones sectoriales según escenario impositivo (toneladas de CO₂)

Sector	Emisiones en escenario base (toneladas de CO ₂)	25 USD/ton CO ₂	50 USD/ton CO ₂	75 USD/ton CO ₂	100 USD/ton CO ₂
Agropecuario	650.409	431 [273; 585]	861 [540; 1.177]	1.292 [800; 1.769]	1.722 [1.073; 2.354]
Silvicultura	2.692	1 [0; 1]	1 [1; 2]	2 [1; 3]	3 [1; 4]
Pesca	43.510	29 [18; 40]	58 [37; 80]	87 [54; 119]	116 [73; 159]
Minería	175.703	28 [19; 37]	56 [39; 74]	83 [58; 109]	111 [76; 146]
Industria de alimentos	603.315	554 [350; 754]	1.109 [700; 1.508]	1.663 [1.026; 2.311]	2.217 [1.363; 3.077]
Industria textil y cuero	6.337	10 [7; 13]	20 [14; 27]	31 [21; 40]	41 [28; 53]
Industria de madera y papel	66.139	265 [151; 380]	530 [298; 755]	795 [458; 1.150]	1.060 [610; 1.533]
Gasolina	30.424	85 [70; 99]	170 [140; 200]	254 [210; 298]	339 [298; 422]
Diésel	27.778	34 [23; 45]	68 [46; 90]	101 [69; 135]	135 [92; 179]
Fuel oil	1.984	0 [0; 1]	1 [1; 1]	1 [1; 2]	2 [1; 3]
Kerosene y carbón	6.614	16 [1; 2]	31 [0; 72]	47 [0; 106]	63 [0; 150]
Industria química y plástica	65.501	81 [54; 107]	162 [112; 214]	244 [166; 318]	325 [222; 424]
Resto de industrias	588.314	956 [659; 1.253]	1.913 [1.312; 2.506]	2.869 [1.971; 3.736]	3.825 [2.624; 4.977]
Energía eléctrica	67.634	33 [32; 35]	66 [61; 68]	100 [91; 101]	133 [122; 140]
Agua	65.132	49 [34; 65]	98 [68; 130]	148 [102; 193]	197 [135; 258]
Construcción	458.039	414 [284; 545]	829 [573; 1.090]	1.243 [857; 1.631]	1.658 [1.145; 2.176]
Comercio	438.110	246 [171; 324]	492 [346; 653]	738 [521; 981]	984 [688; 1.301]
Transporte de pasajeros	1.474.940	14.516 [10.782; 17.935]	29.032 [21.873; 36.033]	43.548 [33.083; 54.175]	58.064 [44.101; 72.228]
Resto de transporte	1.098.575	4.598 [3.471; 5.724]	9.196 [7.009; 11.469]	13.794 [10.316; 17.083]	18.392 [13.754; 22.773]
Servicios	1.259.765	402 [265; 491]	804 [517; 995]	1.206 [781; 1.487]	1.607 [1.033; 1.978]
Total	7.130.916	22.748 [16.665; 28.437]	45.497 [33.674; 57.143]	68.245 [50.571; 85.747]	90.993 [67.419; 114.335]
Variación %	-	-0,32% [-0,40%; -0,23%]	-0,64% [-0,80%; -0,47%]	-0,96% [-1,20%; -0,71%]	-1,28% [-1,60%; -0,95%]

Fuente: Elaboración propia. Nota: Los paréntesis representan los intervalos de confianza al 95%.

5. Conclusiones

En este estudio se implementó un enfoque top-down que vincula elasticidades de un sistema de demanda y la extensión ambiental del modelo de precios de Leontief para analizar el impacto económico y ambiental que tendría la introducción de impuestos al carbono en Costa Rica. Específicamente, se plantearon cuatro escenarios con tasas impositivas de 25, 50, 75 y 100 USD/ton CO₂. Las fuentes de información empleadas fueron la MIP y COU publicadas por el Banco Central de Costa Rica en 2017 y la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos 2018.

Los modelos AIDS y QUAIDS permitieron estimar elasticidades precio y elasticidades ingreso para una cesta compuesta por nueve bienes o servicios. Los resultados indican que “Alimentos”, “Electricidad” y “Resto de bienes y servicios” poseen una demanda inelástica, mientras que “Gas licuado”, “Leña”, “Gasolina”, “Diésel” y “Transporte público” tienen demandas elásticas. Además, el modelo QUAIDS permite concluir que los consumidores consideran a los bienes y servicios agrupados en “Alimentos” y “Restos de bienes y servicios” como bienes necesarios, mientras que “Gasolina” y “Transporte público” son bienes de lujo.

La extensión ambiental del modelo Leontief arroja variaciones pequeñas en los precios de la gran mayoría de los sectores económicos después de la introducción de impuestos al carbono. Los sectores que más incrementan sus precios son “Resto de transporte” (5,3%), “Minería” (4,7%), “Transporte de pasajeros” (4,2%) y “Pesca” (4,2%) para un impuesto de 100 USD/ton CO₂. Estos incrementos explican por el alto consumo de gasolina y diésel en los sectores asociados al transporte y al consumo de insumos intensivos en emisiones de CO₂ en los sectores extractivos de recursos naturales.

La vinculación de las variaciones de precio simuladas con el modelo de precios de Leontief y las elasticidades estimadas con el modelo QUAIDS permiten calcular las variaciones porcentuales de la producción sectorial. Los resultados muestran que los sectores modifican levemente su producción cuando se introducen los impuestos al carbono. En todos los escenarios impositivos se destacan las variaciones de los sectores “Madera y papel”, “Transporte de pasajeros” y “Resto de transporte”, los cuales solo alcanzan variaciones de -1,6%, -3,9% y -1,7% respectivamente para un impuesto de 100 USD/ton CO₂. Cabe señalar que los escenarios impositivos de 25, 50, 75 y 100 USD/ton CO₂ solamente provocan cambios en la producción agregada de -0,1%, -0,2%, -0,3% y -0,4%, respectivamente.

En cuanto al impacto ambiental, los sectores “Transporte de pasajeros”, “Resto de transporte”, “Resto de industrias”, “Industria de alimentos” y “Agropecuario” reducen 58.064, 18.392, 3.825, 2.217 y 1.722 toneladas de CO₂ respectivamente para un impuesto máximo de 100 USD/ton CO₂. A nivel agregado se estima una variación de -0,3%, -0,6%, -1,0% y -1,3%, equivalente a reducciones de 22.748, 45.497, 68.254 y 90.993 toneladas de CO₂ para los impuestos de 25, 50, 75 y 100 USD/ton CO₂ respectivamente. A partir de estos resultados se puede concluir que los sectores asociados al transporte son los más afectados por los impuestos al carbono en Costa Rica. Lo anterior, se explica porque la red eléctrica de

este país está basada en un 100% en energías renovables, así que las mayores emisiones provienen del transporte. Sin embargo, los impuestos al carbono generan escasas reducciones de emisiones sectoriales y agregadas, las cuales no contribuyen de forma relevante al cumplimiento de las metas de descarbonización del país. En consecuencia, el diseño de políticas climáticas debería enfocarse en reducir las emisiones del transporte privado, público y de carga.

Como limitaciones del estudio se puede mencionar que durante el desarrollo de esta investigación existieron obstáculos relacionados a la disponibilidad de los datos necesarios para calibrar el modelo Leontief y la estimación de emisiones a nivel sectorial. Por otra parte, en este estudio solamente se analizaron los patrones de consumo de la población general de Costa Rica, sin realizar una distinción por nivel socioeconómico. Así que extensiones a este trabajo podrían enfocarse en desagregación del comportamiento de los distintos quintiles y evaluar su impacto en la reducción de emisiones.

Referencias

- An, K., Zhang, S., Huang, H., Liu, Y., Cai, W. & Wang, C. (2021). Socioeconomic impacts of household participation in emission trading scheme: A Computable General Equilibrium-based case study. *Applied Energy*, 288, 116647. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116647>
- Aziz, S., Barua, S. & Chowdhury, S. (2022). Cooking energy use in Bangladesh: Evidence from technology and fuel choice. *Energy*, 250, 123696. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123696>
- Banks, J., Blundell, R. & Lewbel, A. (1997). Quadratic Engel Curves and Consumer Demand. *The Review of Economics and Statistics*, 79(4), 527-539. <https://doi.org/10.1162/003465397557015>
- Bjelle, E., Steen-Olsen, K. & Wood, R. (2018). Climate change mitigation potential of Norwegian households and the rebound effect. *Journal of Cleaner Production*, 172, 208-217. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.089>
- Bulmer-Thomas, V. (1978). Trade, structure and linkages in Costa Rica: An input-output approach. *Journal of Development Economics*, 5(1), 73-86. [https://doi.org/10.1016/0304-3878\(78\)90042-1](https://doi.org/10.1016/0304-3878(78)90042-1)
- Campagnolo, L. & Cian, E. (2022). Distributional consequences of climate change impacts on residential energy demand across Italian households. *Energy Economics*, 110, 106020. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.106020>
- Capitán, T., Alpízar, F., Madrigal-Ballesteros, R. & Pattanayak, S. (2021). Time-varying pricing may increase total electricity consumption: Evidence from Costa Rica. *Resource and Energy Economics*, 66, 101264. <https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2021.101264>
- Caro, J., Melo, G., Molina, J. & Salgado, J. (2021). Censored QUAIDS estimation with quaidsc. *Boston College Department of Economics*, 1045.
- Chai, L., Han, A. & Ma, S. (2021). Employing Input-Output Model to Assess the Water Footprint of Energy System. *Water Footprint. Environmental Footprints and Eco-design of Products and Processes*, 1, 157-185. https://doi.org/10.1007/978-981-33-4377-1_6
- Chen, Z., Tan, Y. & Xu, J. (2022). Economic and environmental impacts of the coal-to-gas policy on households: Evidence from China. *Journal of Cleaner Production*, 341, 130608. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130608>
- Choumert-Nkolo, J., Motel, P. & Roux, L. (2019). Stacking up the ladder: A panel data analysis of Tanzanian household energy choices. *World Development*, 115, 222-235. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2018.11.016>
- Dal, E., Rivera, R., Opazo, C. & Madrigal, M. (2022). Fiscal Reform in Costa Rica: Price Elasticities of Major Food Categories to Inform Decision-Making. *Frontiers in Nutrition*, 9, 836501. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.836501>

- Danlami, A., Applanaidu, S. & Islam, R. (2019). Movement towards the adoption of non-traditional household lighting fuel energy in developing areas. *Biofuels*, 10(5), 623-633. <https://doi.org/10.1080/17597269.2017.1338125>
- Deaton, A. & Muellbauer, J. (1980a). An Almost Ideal Demand System. *The American Economic Review*, 70(3), 312-326.
- Deaton, A., & Muellbauer, J. (1980b). *Economics and consumer behavior*. Cambridge University Press.
- Díaz, A. & Medlock, K.B. (2021). Price elasticity of demand for fuels by income level in Mexican households. *Energy Policy*, 151, 112132. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112132>
- Du, Q., Han, X., Li, Y., Li, Z., Xia, B. & Guo, X. (2021). The energy rebound effect of residential buildings: Evidence from urban and rural areas in China. *Energy Policy*, 153, 112235. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112235>
- Duarte, R., Miranda-Buetas, S. & Sarasa, C. (2021). Household consumption patterns and income inequality in EU countries: Scenario analysis for a fair transition towards low-carbon economies. *Energy Economics*, 104, 105614. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105614>
- Fabregat-Aibar, L., Niñerola, A. & Pié, L. (2022). Computable general equilibrium models for sustainable development: past and future. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 38972-38984. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18030-z>
- Filippini, M. & Obrist, A. (2022). Are households living in green certified buildings consuming less energy? Evidence from Switzerland. *Energy Policy*, 161, 112724. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112724>
- Galindo, L., Samaniego, J., Alatorre, J. & Ferrer, J. (2015). Meta-análisis de las elasticidades ingreso y precio de la demanda de gasolina: implicaciones de política pública para América Latina. *Revista Cepal*, 115, 7-25. <https://doi.org/10.18356/b6b28d51-es>
- Garza, M.G.G., Rodríguez, J.O., Palencia, E.P. (2022). The Effect of Energy Prices on Mexican Households' Consumption. *Lectures Notes in Networks and Systems*, 384, 47-56. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94485-8_4
- Goldstein, G.A., DeLaquil, P., Sikharulidze, A. et al. (2021). Costa Rica — Assessing Climate Mitigation Pathways to Support NDC Implementation. *Environmental Modeling & Assessment*, 26, 927–946. <https://doi.org/10.1007/s10666-021-09799-x>
- Gupta, D., Ghersi, F., Vishwanathan, S. & Garg, A. (2020). Macroeconomic assessment of India's development and mitigation pathways. *Climate Policy*, 20(7), 779-799. <https://doi.org/10.1080/14693062.2019.1648235>
- Hall, L. & Buckley, A. (2016). A review of energy systems models in the UK: Prevalent usage and categorization. *Applied Energy*, 169, 607-628. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.044>
- Jehle, G. & Reny, P. (2011). *Advanced Microeconomic Theory*. Essex: Pearson Education Limited, 136.

- Kitzes, J. (2013). An introduction to Environmentally-Extended Input-Output Analysis. *Resources*, 2(4), 489-503. <https://doi.org/10.3390/resources2040489>
- Lecocq, S. & Robin, J. (2015). Estimating almost-ideal demand systems with endogenous regressors. *The Stata Journal*, 15(2), 554-573. <https://doi.org/10.1177/1536867x1501500214>
- Lee, H., Kang, S. & Koo, Y. (2020). A hybrid energy system model to evaluate the impact of climate policy on the manufacturing sector: Adoption of energy-efficient technologies and rebound effects. *Energy*, 212, 118718. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118718>
- Leontief, W. (Ed.). (1986). *Input-output economics*. Oxford University Press.
- Leontief, W. (1970). Environmental Repercussions and the Economic Structure: An Input-Output Approach. *Review of Economics and Statistics*, 52, 262-271.
- Li, X., Li, Z. & Wang, Z. (2020). The welfare effects of carbon tax on Chinese households: A study based on the 2013 Chip Survey Data. *Chinese Journal of Urban and Environmental Studies*, 8(4), 2050019. <https://doi.org/10.1142/S2345748120500190>
- Ma, X., Du, J., Zhang, M. & Ye, Y. (2016). Indirect carbon emissions from household consumption between China and the USA: based on an input–output model. *Natural Hazards*, 84, 399-410. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2508-5>
- Mardones, C. & Baeza, N. (2018). Economic and environmental effects of a CO₂ tax in Latin American countries. *Energy Policy*, 114, 262-273. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.12.001>
- Mardones, C. & Mena, C. (2020). Effects of the internalization of the social cost of global and local air pollutants in Chile. *Energy Policy*, 147, 111875. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111875>
- Mardones, C. & Velásquez, A. (2021). Macroeconomic, intersectoral and environmental effects of R&D subsidies in Chile: An input-output approach. *Technological Forecasting and Social Change*, 173, 121112. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121112>
- Miller, R. & Blair P. (2009). *Input-Output Analysis: Foundations and Extensions*. Cambridge University Press.
- Moz-Christofoletti, M. & Pereda, P. (2021a). Distributional welfare emission effects of energy tax policies in Brazil. *Energy Economics*, 104, 105616. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105616>
- Moz-Christofoletti, M. & Pereda, P. (2021b). Winners and losers: the distributional impacts of a carbon tax in Brazil. *Ecological Economics*, 183, 106945. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.106945>
- Muller, C. & Yan, H. (2018). Household fuel use in developing countries: Review of theory and evidence. *Energy Economics*, 70, 429-439. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.01.024>
- Okonkwo, J. (2021). Welfare effects of carbon taxation on South African households. *Energy Economics*, 96, 104903. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.104903>

- Prina, M., Groppi, D., Nastasi, B. & García, D. (2021). Bottom-up energy system models applied to sustainable islands. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 152, 111625. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111625>
- Poi, B. P. (2012). Easy Demand-System Estimation with Quads. *The Stata Journal*, 12(3), 433–446. <https://doi.org/10.1177/1536867X1201200306>
- Stone, R. (1954). *The Measurement of Consumers' Expenditure and Behaviour in the United Kingdom, 1920-1938*. Cambridge University Press.
- Stiglitz, J. & Stern, N. (2017). *Report of the High-Level Commission on Carbon Prices*. https://static1.squarespace.com/static/54ff9c5ce4b0a53deccfb4c/t/5b0d873c575d1f57cbf694a4/1527613253000/CPLC_LeadershipReport2018_May2018Update.pdf
- Rasyid, M. & Kristina, A. (2021). Estimation of demand system for household energy consumption: Empirical evidence from Indonesia. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 11(6), 289-295. <https://doi.org/10.32479/ijeep.11714>
- Renner, S., Lay, J. & Greve, H. (2018). Household welfare and CO₂ emission impacts of energy and carbon taxes in Mexico. *Energy Economics*, 72, 222-235. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.04.009>
- Rosas-Flores, J., Bakhat, M., Rosas-Flores, D. & Zayas, J. (2017). Distributional effects of subsidy removal and implementation of carbon taxes in Mexican households. *Energy Economics*, 61, 21-28. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2016.10.021>
- Sajjad, Ur Rahman, Z. (2021). A micro-level data analysis of household energy demand in Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan: An application of linear approximate almost ideal demand system. *Growth and Change*, 52, 518– 538. <https://doi.org/10.1111/grow.12450>
- Shinde, R., Froemelt, A., Kim, A. & Hellweg, S. (2022). A novel machine-learning approach for evaluating rebounds-associated environmental footprint of households and application to cooperative housing. *Journal of Environmental Management*, 304, 114205. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114205>
- Shonkwiler, J.S. and Yen, S.T. (1999), Two-Step Estimation of a Censored System of Equations. *American Journal of Agricultural Economics*, 81, 972-982. <https://doi.org/10.2307/1244339>
- Song, K., Qu, S., Taiebat, M., Liang, S. & Xu, M. (2019). Scale, distribution and variations of global greenhouse gas emissions driven by U.S. households. *Environment International*, 133, 105137. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105137>
- Su, X., Gherzi, F., Teng, F., Treut, G. & Liang, M. (2021). The economic impact of a deep decarbonisation pathway for China: a hybrid model analysis through bottom-up and top-down linking. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 27, 11. <https://doi.org/10.1007/s11027-021-09979-w>
- Subramanian A.S.R., Gundersen, T. & Adams, T. (2018). Modeling and Simulation of Energy Systems: A Review. *Processes*, 6(12), 238. <https://doi.org/10.3390/pr612023>

Tang, B., Guo, Y., Yu, B. & Harvey, L.D. (2021). Pathways for decarbonizing China's building sector under global warming thresholds. *Applied Energy*, 15, 117213. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117213>

Waleed, K. & Mirza, F. (2020). Examining behavioral patterns in household fuel consumption using two-stage-budgeting framework for energy and environmental policies: Evidence based on micro data from Pakistan. *Energy Policy*, 147, 111835. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111835>

Yan, Y., Zhang, H., Long, Y., Zhou, X., Xu, N. & Liang, Y. (2020). A factor-based bottom-up approach for the long-term electricity consumption estimation in the Japanese residential sector. *Journal of Environmental Management*, 270, 110750. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110750>

Zabaloy M. & Viego, V. (2022). Household electricity demand in Latin America and the Caribbean: A meta-analysis of price elasticity. *Utilities Policy*, 75, 101334. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2021.101334>

Anexos

Anexo A: Agregación de productos y servicios en sectores económicos

Tabla A- 1: Agregación de productos en 20 sectores económicos

Sector Económico	Producto/Servicio
Agropecuario	Frijol
	Maíz
	Trigo
	Otros cereales
	Legumbres y otras semillas oleaginosas
	Arroz
	Melón
	Cebolla
	Chayote
	Papa
	Raíces y tubérculos
	Hortalizas
	Caña de azúcar
	Flores
	Follajes
	Banano
	Plátano
	Piña
	Palma aceitera
	Café en fruta
	Sandía
	Mango
	Naranja
	Otras frutas, nueces y otros frutos oleaginosos
	Palmito
	Otros productos de plantas no perennes y perennes no clasificado previamente (n.p.c)
	Plantas y raíces vivas
	Ganado bovino
	Ganado porcino
	Pollo en pie
	Otros animales vivos
	Huevos
	Leche cruda
Otros productos animales n.c.p.	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A-1: Agregación de productos en 20 sectores económicos (continuación)

	Servicios de apoyo a la agricultura, la ganadería y actividades postcosecha
Silvicultura	Productos de la silvicultura, de la extracción de la madera y de la caza
Pesca	Productos de la pesca Productos de la acuicultura
Minería	Piedra, arena y arcilla Sal Petróleo y gas natural Otros minerales metálicos, no metálicos y servicios de apoyo
Industria de Alimentos	Carne y despojos comestibles de aves Carne y despojos comestibles de ganado vacuno Carne y despojos comestibles de ganado porcino Embutidos y otros productos cárnicos Pescados, crustáceos y moluscos conservados Frutas, legumbres y hortalizas en conserva Aceites y grasas de origen vegetal y animal Productos lácteos Arroz descascarillado, elaborado y semielaborado Harina de Trigo Otros productos de molinería n.c.p., almidones y sus derivados Productos de panadería y tortillas de trigo y maíz Azúcar de caña, melazas, jarabes y otros azúcares Cacao, chocolates y productos de confitería Macarrones, fideos y productos farináceos análogos Café oro Café molido, soluble, extractos y concentrados Comidas y platos preparados Otros productos alimenticios n.c.p. Alimentos preparados para animales Bebidas alcohólicas destiladas y vinos Cerveza, malta, bebidas no alcohólicas y agua embotellada Productos de tabaco
Industrial de textil y Cuero	Hilado y tejidos Productos textiles, excepto prendas de vestir Prendas de vestir Cuero y productos conexos, excepto calzado Calzado

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A-1: Agregación de productos en 20 sectores económicos (continuación)

Industria de madera y papel	Madera y corcho, productos de madera y corcho, excepto muebles; artículos de paja y materiales trenzables Papel y productos de papel Productos de la edición, impresión y grabaciones excepto de programas informáticos
Gasolina	Gasolina
Diésel	Diesel
Fuel oil	Bunker
Kerosene y Carbón	Otros productos derivados del petróleo y de coque
Industria de la Química y del Plástico	Aceites y grasas lubricantes Sustancias químicas básicas y abonos, compuestos de nitrógeno, pesticidas y otros productos químicos de uso agropecuario Plásticos y caucho sintético en formas primarias Pinturas, barnices, revestimientos, tintas de imprenta y masillas Jabones, detergentes, perfumes y preparados de tocador Fibras artificiales y productos químicos n.c.p Productos farmacéuticos y medicinales Productos de caucho Productos de plástico
Resto de Industrias	Vidrio y productos de vidrio Productos refractarios, materiales de construcción de arcilla y otros productos de porcelana y cerámica Cemento, cal y yeso Artículos de hormigón, cemento y yeso y otros productos minerales no metálicos n.c.p. Productos Básicos de Hierro y Acero Productos primarios de aluminio, zinc, oro, plata y otros semiacabados por un proceso de fundición Productos de metal Componentes y tableros electrónicos, computadoras y equipo periférico Equipos de comunicaciones y aparatos electrónicos de consumo Equipo de medición, prueba, navegación y control y de relojes Equipo de irradiación, electrónico, médico y terapéutico Instrumentos ópticos, fotográfico, soportes magnéticos y ópticos Pilas, baterías, acumuladores, cables y dispositivos de cableado Refrigeradoras, cocinas, lavadoras y otros aparatos de uso doméstico Maquinaria de uso general y especial, partes y piezas Motores, generadores, transformadores y otro equipo eléctrico

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A-1: Agregación de productos en 20 sectores económicos (continuación)

	Vehículos automotores, carrocerías, remolques y semirremolques
	Partes y piezas para vehículos automotores
	Otros tipos de equipo de transporte
	Muebles de madera
	Muebles de otro tipo de material, excepto de piedra, hormigón y cerámica
	Instrumentos y suministros médicos y dentales
	Otros productos manufactureros
	Desperdicios y desechos
	Servicios de reparación e instalación de maquinaria y equipo
	Servicios de manufactura
Energía Eléctrica	Energía eléctrica, gas, vapor y aire acondicionado
Agua	Agua potable
	Servicios de evacuación de aguas residuales
	Servicios de recogida, tratamiento y eliminación de desechos; recuperación de materiales
	Servicios de protección del medio ambiente
Construcción	Edificaciones residenciales
	Edificaciones no residenciales
	Carreteras y vías férreas
	Construcción de proyectos de servicio público y otras obras de ingeniería civil
	Servicios especializados de la construcción
Comercio	Servicios de Comercio
	Mantenimiento y reparación de vehículos automotores
Transporte Pasajeros	Servicios de transporte terrestre de pasajeros excepto taxis
	Servicio de taxis
	Transporte de pasajeros por vía aérea
Resto de transporte	Transporte por ferrocarril
	Transporte de carga
	Servicios de almacenamiento y depósito
	Servicios de estacionamientos
	Carga, descarga y otros servicios vinculados al transporte
	Otros servicios de apoyo al transporte
	Servicios postales y de mensajería
Servicios	Servicios de alojamiento
	Servicio de suministro de comida y bebidas
	Servicios de radio, de televisión, películas, videos y otros afines

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A-1: Agregación de productos en 20 sectores económicos (continuación)

Servicios de telefonía e internet
Otros servicios de telecomunicaciones
Servicios de información, programación y consultoría informática, edición de programas informáticos y afines
Servicios de banca central
Otros servicios explícitos de intermediación monetaria
Servicios de intermediación financiera medidos indirectamente
Otros servicios financieros y de banca de inversión
Servicios de seguros, reaseguros y fondos de pensiones
Servicios auxiliares de la intermediación monetaria y financiera
Servicios auxiliares de seguros y fondos de pensiones
Servicios de alquiler de viviendas
Servicios de alquiler de inmuebles no residenciales y otros servicios inmobiliarios
Servicios jurídicos
Servicios de contabilidad, consultoría fiscal y otros
Servicios de consultoría en gestión financiera, recursos humanos, mercadeo, oficinas principales y afines
Servicios de arquitectura, ingeniería y conexos
Servicios de investigación científica y desarrollo
Servicios de publicidad, provisión de espacios de publicidad y estudios de mercado
Otros servicios profesionales, científicos y técnicos
Servicios veterinarios
Servicios de alquiler de automotores
Servicios de alquiler de efectos personales y enseres domésticos
Servicios de alquiler de maquinaria y equipo
Alquiler y arrendamiento de licencias, derechos de autor, patentes y franquicias
Servicios de agencias de empleo
Servicios de agencias de viajes, operadores turísticos, servicios de reservas y actividades conexas
Servicios de seguridad e investigación
Limpieza de edificios y cuidado del paisaje y mantenimiento
Servicios administrativos y de apoyo de oficina y otras actividades de apoyo a las empresas
Servicios públicos generales del gobierno

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A-1: Agregación de productos en 20 sectores económicos (continuación)

Servicios a la comunidad en general

Servicios administrativos de los regímenes de seguridad social obligatoria

Servicios de enseñanza

Servicios de atención de la salud humana y de asistencia social

Servicios creativos, artísticos y de entretenimiento

Servicios de bibliotecas, archivos y museos y otros culturales

Servicios de juegos de azar y apuestas

Servicios deportivos

Servicios de esparcimiento y recreativos

Servicios de asociaciones empresariales, profesionales, sindicatos, políticas y afines

Servicios de reparación de computadoras, efectos personales y enseres domésticos

Servicios de lavado, secado y limpieza de prendas

Servicios de peluquería y otros tratamientos de belleza

Servicios funerarios y conexos

Otros servicios n.c.p.

Servicios domésticos

Fuente: Elaboración propia.

Anexo B: Parámetros estimados en los sistemas de demanda AIDS y QUAIDS**Tabla B-1: Parámetros estimados con el modelo AIDS**

Parámetros		Coefficiente	Error estándar	z	P> z
alpha	alpha_1	0,6942	0,0211	32,9600	0,0000
	alpha_2	0,3448	0,0182	18,9500	0,0000
	alpha_3	-0,1425	0,0129	-11,0900	0,0000
	alpha_4	-0,0839	0,0098	-8,5700	0,0000
	alpha_5	-0,0099	0,0048	-2,0400	0,0410
	alpha_6	0,0016	0,0006	2,5400	0,0110
	alpha_7	-0,0191	0,0294	-0,6500	0,5160
	alpha_8	0,1248	0,0236	5,2900	0,0000
	alpha_9	0,0899	0,0136	6,6200	0,0000
beta	beta_1	0,0199	0,0022	9,2200	0,0000
	beta_2	0,0305	0,0020	14,9500	0,0000
	beta_3	-0,0556	0,0019	-28,8100	0,0000
	beta_4	-0,0160	0,0009	-18,0400	0,0000
	beta_5	-0,0020	0,0004	-4,4900	0,0000
	beta_6	0,0001	0,0000	4,4200	0,0000
	beta_7	0,0170	0,0023	7,2900	0,0000
	beta_8	0,0074	0,0007	10,2600	0,0000
	beta_9	-0,0012	0,0020	-0,5900	0,5570
gamma	gamma_1_1	0,2569	0,0085	30,1500	0,0000
	gamma_2_1	-0,2277	0,0082	-27,7100	0,0000
	gamma_3_1	-0,0067	0,0006	-10,8600	0,0000
	gamma_4_1	-0,0045	0,0008	-5,9300	0,0000
	gamma_5_1	-0,0010	0,0004	-2,5800	0,0100
	gamma_6_1	0,0004	0,0002	2,0600	0,0390
	gamma_7_1	-0,0106	0,0019	-5,5800	0,0000
	gamma_8_1	-0,0096	0,0019	-5,0400	0,0000
	gamma_9_1	0,0029	0,0009	3,0200	0,0030
	gamma_2_2	0,2195	0,0078	28,1000	0,0000
	gamma_3_2	-0,0063	0,0006	-11,1400	0,0000
	gamma_4_2	-0,0024	0,0005	-4,5600	0,0000
	gamma_5_2	-0,0003	0,0003	-0,9600	0,3390
	gamma_6_2	-0,0002	0,0002	-0,9900	0,3220
	gamma_7_2	-0,0033	0,0016	-2,1300	0,0330
	gamma_8_2	0,0174	0,0015	11,2600	0,0000
	gamma_9_2	0,0034	0,0008	4,3400	0,0000
	gamma_3_3	0,0063	0,0008	7,9900	0,0000
	gamma_4_3	0,0016	0,0002	7,4500	0,0000
	gamma_5_3	0,0001	0,0001	1,4800	0,1390

Fuente: Elaboración propia.

Tabla B-1: Parámetros estimados con el modelo AIDS (continuación)

	gamma_6_3	0,0000	0,0000	-1,1000	0,2730
	gamma_7_3	0,0028	0,0007	3,7600	0,0000
	gamma_8_3	0,0002	0,0003	0,7100	0,4810
	gamma_9_3	0,0020	0,0005	4,1500	0,0000
	gamma_4_4	-0,0023	0,0008	-2,8400	0,0040
	gamma_5_4	0,0012	0,0002	5,9900	0,0000
	gamma_6_4	0,0001	0,0001	0,9300	0,3510
	gamma_7_4	0,0001	0,0004	0,3200	0,7490
	gamma_8_4	0,0055	0,0012	4,7200	0,0000
	gamma_9_4	0,0007	0,0002	3,2600	0,0010
	gamma_5_5	-0,0007	0,0005	-1,3700	0,1700
	gamma_6_5	0,0000	0,0000	0,3400	0,7330
	gamma_7_5	0,0003	0,0002	1,4400	0,1490
	gamma_8_5	0,0004	0,0005	0,7700	0,4430
	gamma_9_5	0,0000	0,0001	0,2000	0,8380
	gamma_6_6	-0,0005	0,0004	-1,2000	0,2310
	gamma_7_6	0,0000	0,0000	-0,4700	0,6390
	gamma_8_6	0,0001	0,0003	0,5100	0,6080
	gamma_9_6	0,0001	0,0000	2,5200	0,0120
	gamma_7_7	0,0088	0,0033	2,6900	0,0070
	gamma_8_7	-0,0030	0,0012	-2,5300	0,0120
	gamma_9_7	0,0049	0,0011	4,3400	0,0000
	gamma_8_8	-0,0138	0,0036	-3,8900	0,0000
	gamma_9_8	0,0028	0,0004	6,3200	0,0000
	gamma_9_9	-0,0168	0,0016	-10,7700	0,0000
eta	eta_miembros_hogar_1	-0,0006	0,0003	-1,8100	0,0710
	eta_miembros_hogar_2	-0,0001	0,0003	-0,4400	0,6640
	eta_miembros_hogar_3	0,0015	0,0003	4,6400	0,0000
	eta_miembros_hogar_4	0,0003	0,0001	2,4100	0,0160
	eta_miembros_hogar_5	0,0000	0,0000	0,7400	0,4610
	eta_miembros_hogar_6	0,0000	0,0000	-1,8300	0,0680
	eta_miembros_hogar_7	0,0004	0,0004	1,0000	0,3160
	eta_miembros_hogar_8	0,0001	0,0001	1,1300	0,2600
	eta_miembros_hogar_9	-0,0016	0,0003	-4,9500	0,0000
	eta_urbano_1	0,0014	0,0011	1,3400	0,1820
	eta_urbano_2	-0,0015	0,0010	-1,5000	0,1330
	eta_urbano_3	-0,0035	0,0012	-2,9700	0,0030
	eta_urbano_4	0,0020	0,0004	4,7200	0,0000
	eta_urbano_5	0,0008	0,0002	3,9400	0,0000
	eta_urbano_6	0,0000	0,0000	-2,3600	0,0180
	eta_urbano_7	-0,0008	0,0013	-0,6000	0,5490
	eta_urbano_8	0,0004	0,0005	0,9400	0,3450

Fuente: Elaboración propia.

Tabla B-1: Parámetros estimados con el modelo AIDS (continuación)

	eta_urbano_9	0,0012	0,0010	1,1800	0,2360
	eta_jsexo_1	0,0005	0,0013	0,4000	0,6880
	eta_jsexo_2	0,0017	0,0012	1,3900	0,1630
	eta_jsexo_3	-0,0014	0,0014	-1,0000	0,3160
	eta_jsexo_4	-0,0002	0,0005	-0,3700	0,7080
	eta_jsexo_5	-0,0004	0,0002	-2,0300	0,0420
	eta_jsexo_6	0,0000	0,0000	1,1500	0,2490
	eta_jsexo_7	-0,0040	0,0016	-2,4800	0,0130
	eta_jsexo_8	-0,0003	0,0005	-0,6100	0,5400
	eta_jsexo_9	0,0040	0,0012	3,3200	0,0010
	eta_casadooconvive_1	0,0058	0,0014	3,9800	0,0000
	eta_casadooconvive_2	0,0033	0,0014	2,3600	0,0180
	eta_casadooconvive_3	0,0024	0,0017	1,3600	0,1750
	eta_casadooconvive_4	0,0001	0,0006	0,2100	0,8370
	eta_casadooconvive_5	0,0005	0,0003	2,0100	0,0440
	eta_casadooconvive_6	0,0000	0,0000	-1,6200	0,1060
	eta_casadooconvive_7	-0,0127	0,0019	-6,7300	0,0000
	eta_casadooconvive_8	-0,0021	0,0006	-3,6900	0,0000
	eta_casadooconvive_9	0,0028	0,0013	2,1400	0,0320
rho	rho_miembros_hogar	0,4243	0,0841	5,0400	0,0000
	rho_urbano	0,0793	0,1056	0,7500	0,4520
	rho_jsexo	-0,3307	0,0891	-3,7100	0,0000
	rho_casadooconvive	0,3700	0,1432	2,5800	0,0100

Fuente: Elaboración propia.

Tabla B-2: Parámetros estimados con el modelo QUAIDS

Parámetros		Coefficiente	Error estándar	z	P> z
alpha	alpha_1	1,3259	0,0417	31,8100	0,0000
	alpha_2	0,7019	0,0385	18,2500	0,0000
	alpha_3	-0,0019	0,0231	-0,0800	0,9340
	alpha_4	-0,0270	0,0182	-1,4800	0,1390
	alpha_5	0,0065	0,0086	0,7500	0,4510
	alpha_6	0,0016	0,0007	2,2700	0,0230
	alpha_7	-0,7561	0,0433	-17,4600	0,0000
	alpha_8	0,1561	0,0307	5,0800	0,0000
	alpha_9	-0,4070	0,0374	-10,8900	0,0000
beta	beta_1	0,1934	0,0124	15,5400	0,0000
	beta_2	0,1162	0,0114	10,2100	0,0000
	beta_3	0,0169	0,0061	2,8000	0,0050
	beta_4	0,0099	0,0048	2,0600	0,0400
	beta_5	0,0032	0,0026	1,2100	0,2270
	beta_6	0,0000	0,0001	0,3400	0,7350
	beta_7	-0,2050	0,0097	-21,1600	0,0000
	beta_8	0,0043	0,0042	1,0200	0,3090
	beta_9	-0,1390	0,0088	-15,7700	0,0000
gamma	gamma_1_1	0,2895	0,0064	44,9000	0,0000
	gamma_2_1	-0,2083	0,0076	-27,4700	0,0000
	gamma_3_1	-0,0018	0,0013	-1,4100	0,1590
	gamma_4_1	-0,0024	0,0011	-2,2400	0,0250
	gamma_5_1	-0,0002	0,0005	-0,4600	0,6480
	gamma_6_1	0,0004	0,0002	2,2100	0,0270
	gamma_7_1	-0,0475	0,0032	-14,7400	0,0000
	gamma_8_1	-0,0071	0,0021	-3,4100	0,0010
	gamma_9_1	-0,0226	0,0024	-9,2500	0,0000
	gamma_2_2	0,2301	0,0093	24,8500	0,0000
	gamma_3_2	-0,0019	0,0008	-2,3300	0,0200
	gamma_4_2	-0,0005	0,0007	-0,6400	0,5230
	gamma_5_2	0,0002	0,0004	0,5000	0,6190
	gamma_6_2	-0,0002	0,0002	-0,9900	0,3210
	gamma_7_2	-0,0256	0,0027	-9,3400	0,0000
	gamma_8_2	0,0181	0,0017	10,6400	0,0000
	gamma_9_2	-0,0119	0,0021	-5,6000	0,0000
	gamma_3_3	0,0025	0,0005	5,0500	0,0000
	gamma_4_3	0,0007	0,0002	3,9500	0,0000
	gamma_5_3	0,0001	0,0001	0,9100	0,3610
	gamma_6_3	0,0000	0,0000	-0,7200	0,4710
	gamma_7_3	-0,0001	0,0014	-0,1000	0,9170
	gamma_8_3	0,0008	0,0003	2,4600	0,0140

Fuente: Elaboración propia.

Tabla B-2: Parámetros estimados con el modelo QUAIDS (continuación)

	gamma_9_3	-0,0002	0,0009	-0,2200	0,8250
	gamma_4_4	-0,0025	0,0008	-3,2700	0,0010
	gamma_5_4	0,0012	0,0002	5,7900	0,0000
	gamma_6_4	0,0001	0,0001	0,9900	0,3240
	gamma_7_4	-0,0017	0,0010	-1,6700	0,0940
	gamma_8_4	0,0058	0,0011	5,0400	0,0000
	gamma_9_4	-0,0007	0,0007	-1,0500	0,2920
	gamma_5_5	-0,0007	0,0005	-1,3400	0,1790
	gamma_6_5	0,0000	0,0000	0,3700	0,7110
	gamma_7_5	-0,0005	0,0005	-0,9400	0,3460
	gamma_8_5	0,0003	0,0005	0,7000	0,4860
	gamma_9_5	-0,0005	0,0003	-1,4000	0,1610
	gamma_6_6	-0,0005	0,0004	-1,2200	0,2240
	gamma_7_6	0,0000	0,0000	-0,4200	0,6730
	gamma_8_6	0,0001	0,0003	0,5100	0,6080
	gamma_9_6	0,0001	0,0000	1,8700	0,0620
	gamma_7_7	0,0479	0,0049	9,7900	0,0000
	gamma_8_7	-0,0047	0,0014	-3,3500	0,0010
	gamma_9_7	0,0322	0,0017	18,6200	0,0000
	gamma_8_8	-0,0156	0,0036	-4,4100	0,0000
	gamma_9_8	0,0023	0,0008	3,0100	0,0030
	gamma_9_9	0,0013	0,0032	0,4200	0,6730
lambda	lambda_1	0,0028	0,0002	13,0100	0,0000
	lambda_2	0,0013	0,0002	6,5700	0,0000
	lambda_3	0,0013	0,0001	10,6000	0,0000
	lambda_4	0,0004	0,0001	4,9200	0,0000
	lambda_5	0,0001	0,0000	1,7900	0,0740
	lambda_6	0,0000	0,0000	-0,6900	0,4910
	lambda_7	-0,0036	0,0002	-21,9000	0,0000
	lambda_8	-0,0001	0,0001	-1,3100	0,1900
	lambda_9	-0,0022	0,0002	-14,2300	0,0000
eta	eta_miembros_hogar_1	-0,0070	0,0007	-10,6700	0,0000
	eta_miembros_hogar_2	-0,0038	0,0005	-6,9200	0,0000
	eta_miembros_hogar_3	-0,0002	0,0003	-0,7800	0,4380
	eta_miembros_hogar_4	-0,0004	0,0002	-2,2200	0,0270
	eta_miembros_hogar_5	-0,0001	0,0001	-1,5000	0,1330
	eta_miembros_hogar_6	0,0000	0,0000	-1,1600	0,2460
	eta_miembros_hogar_7	0,0079	0,0008	10,3500	0,0000
	eta_miembros_hogar_8	0,0000	0,0002	0,1200	0,9030
	eta_miembros_hogar_9	0,0036	0,0005	7,2500	0,0000
	eta_urbano_1	-0,0109	0,0024	-4,5600	0,0000
	eta_urbano_2	-0,0077	0,0012	-6,2300	0,0000

Fuente: Elaboración propia.

Tabla B-2: Parámetros estimados con el modelo QUAIDS (continuación)

eta_urbano_3	-0,0060	0,0010	-6,2300	0,0000
eta_urbano_4	0,0003	0,0004	0,7600	0,4500
eta_urbano_5	0,0004	0,0003	1,5400	0,1240
eta_urbano_6	0,0000	0,0000	-1,9900	0,0470
eta_urbano_7	0,0136	0,0027	4,9600	0,0000
eta_urbano_8	0,0003	0,0004	0,6100	0,5400
eta_urbano_9	0,0101	0,0018	5,6100	0,0000
eta_jsexo_1	-0,0046	0,0025	-1,8200	0,0690
eta_jsexo_2	-0,0024	0,0015	-1,6000	0,1100
eta_jsexo_3	0,0006	0,0011	0,5400	0,5920
eta_jsexo_4	0,0001	0,0004	0,3500	0,7240
eta_jsexo_5	-0,0004	0,0002	-1,8600	0,0630
eta_jsexo_6	0,0000	0,0000	1,0200	0,3060
eta_jsexo_7	0,0008	0,0033	0,2400	0,8080
eta_jsexo_8	-0,0004	0,0004	-0,9100	0,3600
eta_jsexo_9	0,0061	0,0021	2,8900	0,0040
eta_casadooconvive_1	-0,0044	0,0027	-1,5900	0,1110
eta_casadooconvive_2	-0,0026	0,0014	-1,8200	0,0690
eta_casadooconvive_3	-0,0004	0,0011	-0,3200	0,7490
eta_casadooconvive_4	-0,0008	0,0004	-1,9000	0,0580
eta_casadooconvive_5	0,0003	0,0003	1,1200	0,2630
eta_casadooconvive_6	0,0000	0,0000	-1,6300	0,1030
eta_casadooconvive_7	0,0006	0,0034	0,1800	0,8600
eta_casadooconvive_8	-0,0009	0,0004	-2,0700	0,0390
eta_casadooconvive_9	0,0082	0,0023	3,6300	0,0000
rho	rho_miembros_hogar	266,7778		
	rho_urbano	122,0534		
	rho_jsexo	38,1400		
	rho_casadooconvive	31,7296		

Fuente: Elaboración propia.

Anexo C: Asignación de elasticidades precio propias

Tabla C-1: Asignación de elasticidades precio propias de grupos de bienes y servicio a cada sector económico

Bien o servicio	Elasticidad precio	Sector
Alimentos	-0,261	Agropecuario
		Pesca
		Industria de alimentos
Electricidad	-0,963	Energía eléctrica
Gas licuado	-1,198	No asignado
Leña	-1,472	Silvicultura
		Industria de madera y papel
Carbón	-5,659	Kerosene y carbón
Gasolina	-1,222	Gasolina
Diésel	-3,111	Diésel
		Fuel oil
Transporte público	-1,041	Transporte de pasajeros
		Resto de transporte
Resto de bienes y servicios	-0,335	Minería
		Industria textil y cuero
		Industria química y plástica
		Resto de industrias
		Agua
		Construcción
		Comercio
		Servicios

Fuente: Elaboración propia.

Anexo D: Producción sectorial según escenario impositivo

Tabla D-1: Producción sectorial y agregada según escenario impositivo

Sector	Producción base (Miles de Millones ₡)	USD 25/ton CO ₂	USD 50/ton CO ₂	USD 75/ton CO ₂	USD 100/ton CO ₂
Agropecuario	3.068	3.066 [3.066; 3.067]	3.064 [3.063; 3.066]	3.062 [3.060; 3.065]	3.060 [3.057; 3.063]
Silvicultura	50	50 [50; 50]	50 [50; 50]	50 [50; 50]	50 [50; 50]
Pesca	59	59 [59; 59]	59 [59; 59]	59 [58; 59]	58 [58; 59]
Minería	210	210 [210; 210]	210 [210; 210]	210 [210; 210]	210 [210; 210]
Industria de alimentos	4.923	4.919 [4.917; 4.920]	4.914 [4.911; 4.917]	4.910 [4.904; 4.915]	4.905 [4.898; 4.912]
Industria textil y cuero	227	227 [227; 227]	226 [226; 227]	226 [226; 226]	226 [225; 226]
Industria de madera y papel	631	628 [627; 629]	626 [624; 628]	623 [620; 626]	621 [616; 625]
Gasolina	290	289 [289; 289]	289 [288; 289]	288 [287; 288]	287 [286; 287]
Diésel	265	265 [264; 265]	264 [264; 264]	264 [264; 264]	264 [263; 264]
Fuel oil	19	19 [19; 19]	19 [19; 19]	19 [19; 19]	19 [19; 19]
Kerosene y carbón	63	63 [63; 63]	63 [62; 63]	63 [62; 63]	62 [62; 63]
Industria química y plástica	1.093	1.092 [1.091; 1.092]	1.090 [1.090; 1.091]	1.089 [1.088; 1.090]	1.088 [1.086; 1.089]
Resto de industrias	3.795	3.789 [3.787; 3.791]	3.783 [3.779; 3.787]	3.777 [3.771; 3.782]	3.770 [3.763; 3.778]
Energía eléctrica	1.006	1.006 [1.005; 1.006]	1.005 [1.005; 1.005]	1.005 [1.004; 1.005]	1.004 [1.004; 1.004]
Agua	354	354 [354; 354]	354 [354; 354]	354 [353; 354]	353 [353; 354]
Construcción	4.397	4.393 [4.392; 4.395]	4.389 [4.387; 4.392]	4.385 [4.382; 4.389]	4.381 [4.376; 4.386]
Comercio	4.538	4.535 [4.534; 4.536]	4.533 [4.531; 4.534]	4.530 [4.528; 4.532]	4.528 [4.524; 4.531]
Transporte de pasajeros	1.855	1.837 [1.833; 1.842]	1.819 [1.810; 1.828]	1.801 [1.787; 1.814]	1.782 [1.764; 1.800]
Resto de transporte	1.421	1.415 [1.414; 1.416]	1.409 [1.406; 1.412]	1.403 [1.399; 1.408]	1.397 [1.392; 1.403]
Servicios	27.105	27.096 [27.094; 27.099]	27.087 [27.083; 27.093]	27.079 [27.073; 27.088]	27.070 [27.062; 27.082]
Total	55.369	55.311 [55.320; 55.353]	55.252 [55.353; 55.269]	55.194 [55.269; 55.337]	55.135 [55.337; 55.219]
Variación %	-	-0,11% [-0,09%; -0,03%]	-0,21% [-0,03%; -0,18%]	-0,32% [-0,18%; -0,06%]	-0,42% [-0,06%; -0,27%]

Fuente: Elaboración propia. Los paréntesis representan los intervalos de confianza al 95%.

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA
RESUMEN MEMORIA DE TÍTULO

Departamento	: Departamento de Ingeniería Civil Industrial
Carrera	: Ingeniería Civil Industrial
Nombre del memorista	: Esteban Nicolás Alvial Campos
Título de la memoria	: Estimación de un sistema de demanda para la evaluación de políticas climáticas en Costa Rica
Fecha de la presentación oral	:
Profesor(es) Guía	: Profesor Cristian Mardones P.
Profesor(es) Revisores	: Profesora Magdalena Jensen C.
Concepto	:
Calificación	:

Resumen
<p>En el presente estudio se analiza el impacto de un impuesto al carbono sobre las emisiones de CO₂ en Costa Rica. Para lo anterior, se estima un sistema de demanda usando los datos de una encuesta de gasto de hogares, lo cual permite obtener las elasticidades de demanda para diversos grupos de bienes. Luego, se implementa la extensión ambiental del modelo de precios Leontief para determinar el cambio en los precios causado por diferentes tasas de impuesto al carbono. Posteriormente, ambos modelos son vinculados a través de un enfoque top-down para obtener los cambios en la producción y emisiones sectoriales. Los principales hallazgos sugieren que los impuestos al carbono afectan principalmente al sector transporte, mientras que el resto de los sectores tienen impactos leves en todos los escenarios impositivos simulados. Lo anterior, se explica por la composición de la matriz energética de Costa Rica, la cual tiene una altísima participación de energías renovables. Finalmente, se sugieren algunas opciones de políticas climáticas para contribuir a la carbono neutralidad de este país.</p>