

---

El comercio internacional de Guatemala a  
través de la ecuación de gravitación y  
métodos autorregresivos para el periodo de  
2002 a 2023

---

Kevin Otniel López Avalos





UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ciencias y Humanidades



**El comercio internacional de Guatemala a través de  
la ecuación de gravitación y métodos autorregresivos  
para el periodo de 2002 a 2023**

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por  
Kevin Otniel López Avalos  
para optar al grado académico de Licenciado en Física

Guatemala,  
2025



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ciencias y Humanidades



**El comercio internacional de Guatemala a través de  
la ecuación de gravitación y métodos autorregresivos  
para el periodo de 2002 a 2023**

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por  
Kevin Otniel López Avalos  
para optar al grado académico de Licenciado en Física

Guatemala,  
2025

Vo.Bo.:

(f)


  
Lic. Michelle Jackeline Peralta Soto

Tribunal Examinador:

(f)

  
Lic. Michelle Jackeline Peralta Soto

(f)

  
Ph.D. Adrián Licht

(f)

  
MSc. Eduardo Martín Álvarez Massis

Fecha de aprobación: Guatemala, sábado 29 de noviembre de 2025.

Además de la Física, siempre me ha interesado la Economía. Esta tesis nació del interés de juntar ambas ramas que a primera vista son opuestas. Para esto se analizó el comercio internacional de Guatemala a través de un análogo de la ley de gravitación universal de Newton y, como estudio de caso, se pronosticó el comercio bilateral de Guatemala con Japón utilizando métodos autorregresivos que tuvieron sus inicios tratando de explicar fenómenos estocásticos.

El alcance de la investigación es empírico. El modelo de gravitación cuenta con diferentes limitaciones, por lo que sus resultados son exploratorios que puede servir de base para nuevas investigaciones. Adicionalmente, el pronóstico del comercio es efectivo a corto plazo y necesita una actualización constante de su serie de tiempo para extender su uso.

Concluida la investigación, se agradece:

A Dios, por todas las bendiciones que me ha dado.

A mi familia, por el amor y el apoyo incondicional.

A mis amigos, por acompañarme durante mi formación profesional.

A mi director, MSc. Eduardo Álvarez Massis, por atender a mis dudas y aconsejarme para mi desarrollo profesional.

Al Dr. Adrián Licht, por guiarme durante la investigación a pesar de no habernos conocido previamente.

A mi asesora, Lic. Michelle Jackeline Peralta Soto, por acompañarme a lo largo de la investigación y por fortalecer mi interés en la Economía durante mis prácticas profesionales en el Instituto Nacional de Estadística (INE).

<b>Prefacio</b>	<b>III</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>VIII</b>
<b>Lista de cuadros</b>	<b>X</b>
<b>Resumen</b>	<b>XI</b>
<b>Abstract</b>	<b>XII</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Objetivos</b>	<b>2</b>
2.1. Objetivo general . . . . .	2
2.2. Objetivos específicos . . . . .	2
<b>3. Justificación</b>	<b>3</b>
<b>4. Marco conceptual</b>	<b>4</b>
<b>5. Marco teórico</b>	<b>6</b>
5.1. Ley de gravitación universal . . . . .	6
5.2. Modelo gravitacional de comercio: siglo XX . . . . .	9
5.3. Modelo gravitacional de comercio: siglo XXI . . . . .	13
5.4. Estudio I: comercio internacional de Guatemala a través de la ecuación de gravitación	15
5.4.1. Etapas de investigación . . . . .	21
5.5. Econofísica . . . . .	23
5.6. Modelos autorregresivos ARIMA y SARIMA . . . . .	24
5.7. La Economía de Japón de la segunda postguerra . . . . .	25
5.8. Estudio II: pronosticación de exportaciones e importaciones entre Japón y Guatemala	27
<b>6. Marco metodológico</b>	<b>29</b>
6.1. Estudio I: comercio internacional de Guatemala a través del modelo de gravitación .	29
6.1.1. Ecuación ingenua . . . . .	29
6.1.2. Ecuación estructural: gravity by gravitas . . . . .	32
6.1.3. Métodos de estimación . . . . .	33
6.1.4. Pruebas de especificación . . . . .	35
6.1.5. Interpretación de resultados . . . . .	36

6.2. Estudio II: pronosticación de las exportaciones e importaciones entre Japón y Guatemala	37
6.2.1. Tipos de industrias . . . . .	37
6.2.2. Procedimiento de estimación . . . . .	38
6.3. Desarrollo de bases de datos . . . . .	40
<b>7. Antecedentes</b>	<b>41</b>
<b>8. Resultados</b>	<b>42</b>
8.1. Estudio I: comercio internacional de Guatemala a través del modelo de gravitación .	42
8.1.1. Primera etapa: comercio bilateral . . . . .	42
8.1.2. Segunda etapa: comercio internacional . . . . .	50
8.1.3. Tercera etapa: comercio mundial . . . . .	68
8.2. Estudio II: pronosticación de las exportaciones e importaciones entre Japón y Guatemala . . . . .	71
8.2.1. Industria agropecuaria: café . . . . .	71
8.2.2. Industria manufacturera: vehículos, material de transporte y artículos de vestuario . . . . .	74
8.2.3. Industria de extracción: hierro y acero . . . . .	79
<b>9. Discusión</b>	<b>82</b>
<b>10. Conclusiones</b>	<b>86</b>
<b>11. Recomendaciones</b>	<b>87</b>
<b>12. Bibliografía</b>	<b>88</b>
<b>Anexos</b>	<b>94</b>
<b>A. Desarrollo de la geodésica de una esfera</b>	<b>94</b>
A.1. Planteamiento del problema . . . . .	94
A.1.1. Coordenadas esféricas . . . . .	95
A.2. Cálculo del diferencial de longitud de arco . . . . .	95
A.2.1. Diferenciales $dx$ , $dy$ y $dz$ . . . . .	95
A.2.2. Sustitución en la fórmula general de longitud de arco . . . . .	95
A.3. Planteamiento de la longitud de arco . . . . .	96
A.4. Optimización a través del cálculo de variaciones . . . . .	96
A.4.1. Aplicación de la ecuación de Euler–Lagrange . . . . .	96
A.5. Solución de la derivada . . . . .	97
A.5.1. Integración . . . . .	98
A.6. Dedución de la ecuación del círculo máximo . . . . .	99
<b>B. Longitud de arco del círculo máximo</b>	<b>101</b>
B.1. Longitud de arco . . . . .	102
B.2. Coordenadas esféricas . . . . .	102
B.3. Determinación del ángulo central . . . . .	102
<b>C. Comercio bilateral: segundo grupo muestral</b>	<b>104</b>
C.1. Guatemala - Estados Unidos . . . . .	104
C.2. Guatemala - México . . . . .	105
C.3. Guatemala - Belice . . . . .	105
C.4. Guatemala - El Salvador . . . . .	106
C.5. Guatemala - Honduras . . . . .	107

<b>D. Serie de tiempo del resto de bienes de la industria de extractiva</b>	<b>108</b>
D.1. Aluminio . . . . .	108
D.2. Derivados del petróleo . . . . .	109
D.3. Zinc . . . . .	109
<b>E. Glosario</b>	<b>110</b>

---

## Lista de figuras

---

5.1.	Ilustración de la balanza de torsión utilizada por Henry Cavendish (Cavendish, 1798)	7
5.2.	Relación entre el comercio internacional total de Guatemala y el producto de ambos PIB durante 2002 - 2006 (elaboración propia)	16
5.3.	Relación entre el comercio internacional total de Guatemala y la distancia durante 2002 - 2006 (elaboración propia)	16
5.4.	Relación entre el comercio internacional total de Guatemala y el producto de ambos PIB durante 2002 - 2010 (elaboración propia)	17
5.5.	Relación entre el comercio internacional total de Guatemala y la distancia durante 2002 - 2010 (elaboración propia)	17
5.6.	Relación entre el comercio internacional total de Guatemala y el producto de ambos PIB durante 2002 - 2014 (elaboración propia)	18
5.7.	Relación entre el comercio internacional total de Guatemala y la distancia durante 2002 - 2014 (elaboración propia)	18
5.8.	Relación entre el comercio internacional total de Guatemala y el producto de ambos PIB durante 2002 - 2018 (elaboración propia)	19
5.9.	Relación entre el comercio internacional total de Guatemala y la distancia durante 2002 - 2018 (elaboración propia)	19
5.10.	Relación entre el comercio internacional total de Guatemala y el producto de ambos PIB durante 2002 - 2023 (elaboración propia)	20
5.11.	Relación entre el comercio internacional total de Guatemala y la distancia durante 2002 - 2023 (elaboración propia)	20
5.12.	Exportación mensual de café hacia Japón (elaboración propia)	28
5.13.	Importación mensual de vehículos y material de transporte desde Japón (elaboración propia)	28
6.1.	Diagrama de flujo del proceso de estimación del modelo ARIMA y los pronósticos de una serie de tiempo. Fuente: Hyndman & Athanasopoulos (2021)	39
8.1.	Exportación mensual de café hacia Japón (elaboración propia)	71
8.2.	Gráfica de residuos (superior), gráfico ACF (inferior izquierdo) e histograma de residuos (inferior derecho) del modelo ARIMA (0,1,3)(2,1,0)[12] (elaboración propia)	72
8.3.	Pronósticos de exportaciones de café (elaboración propia)	72
8.4.	Importación mensual de vehículos y material de transporte (elaboración propia)	74
8.5.	Gráfica de residuos (superior), gráfico ACF (inferior izquierdo) e histograma de residuos (inferior derecho) del modelo ARIMA (0,1,1)(2,0,0)[12] de la importación de vehículos y material de transporte (elaboración propia)	75
8.6.	Exportación mensual de artículos de vestuario hacia Japón (elaboración propia)	76

8.7. Gráfica de residuos (superior), gráfico ACF (inferior izquierdo) e histograma de residuos (inferior derecho) del modelo ARIMA (0,1,1)(2,0,0)[12] (elaboración propia) . .	77
8.8. Pronósticos de exportaciones de artículos de vestuario (elaboración propia) . . . . .	77
8.9. Importación mensual de hierro y acero de Japón (elaboración propia) . . . . .	79
8.10. Gráfica de residuos (superior), gráfico ACF (inferior izquierdo) e histograma de residuos (inferior derecho) del modelo ARIMA (0,1,3) (elaboración propia) . . . . .	80
8.11. Pronósticos de importaciones de hierro (elaboración propia) . . . . .	80
A.1. Puntos en la superficie de una esfera (elaboración propia) . . . . .	94
A.2. Distancia geodésica entre A y B; un círculo máximo (elaboración propia) . . . . .	100
B.1. Componentes de los puntos A y B (elaboración propia) . . . . .	101
D.1. Importación mensual de aluminio (elaboración propia) . . . . .	108
D.2. Importación mensual de derivados del petróleo (elaboración propia) . . . . .	109
D.3. Importación mensual de zinc (elaboración propia) . . . . .	109

---

Lista de cuadros

---

5.1. Matriz de correlación entre variables (elaboración propia) . . . . .	15
6.1. Variables macroeconómicas . . . . .	29
6.2. Variables de gobernanza . . . . .	30
6.3. Variables socioculturales . . . . .	31
6.4. Variables geográficas . . . . .	31
6.5. Variables del modelo estructural <i>gravity by gravitas</i> . . . . .	32
8.1. Comercio bilateral entre Guatemala y Estados Unidos - periodo completo . . . . .	42
8.2. Comercio bilateral entre Guatemala y México - periodo completo . . . . .	44
8.3. Comercio bilateral entre Guatemala y Belice - periodo completo . . . . .	45
8.4. Comercio bilateral entre Guatemala y El Salvador - periodo completo . . . . .	46
8.5. Comercio bilateral entre Guatemala y Honduras - periodo completo . . . . .	47
8.6. Comercio internacional entre Guatemala y sus países vecino - periodo completo . . . . .	48
8.7. Comercio internacional entre Guatemala y COMESA - periodo completo . . . . .	50
8.8. Comercio internacional entre Guatemala y COMESA - periodo filtrado . . . . .	51
8.9. Comercio internacional entre Guatemala y TLCAN - periodo completo . . . . .	53
8.10. Comercio internacional entre Guatemala y TLCAN - periodo filtrado . . . . .	53
8.11. Comercio internacional entre Guatemala y MERCOSUR - periodo completo . . . . .	55
8.12. Comercio internacional entre Guatemala y MERCOSUR - periodo filtrado . . . . .	56
8.13. Comercio internacional entre Guatemala y ASEAN3 - periodo completo . . . . .	58
8.14. Comercio internacional entre Guatemala y ASEAN3 - periodo filtrado . . . . .	59
8.15. Comercio internacional entre Guatemala y UE - periodo completo . . . . .	61
8.16. Comercio internacional entre Guatemala y la UE - periodo filtrado . . . . .	62
8.17. Comercio internacional entre Guatemala y ANZCERTA - periodo completo . . . . .	63
8.18. Comercio internacional entre Guatemala y ANZCERTA - periodo filtrado . . . . .	64
8.19. Comercio entre Guatemala y los principales bloques comerciales - periodo completo . . . . .	65
8.20. Comercio entre Guatemala y los principales bloques comerciales - periodo filtrado . . . . .	66
8.21. Comercio internacional de Guatemala - periodo completo . . . . .	68
8.22. Comercio internacional de Guatemala - periodo filtrado . . . . .	69
8.23. Pronóstico mensual de exportación de café con intervalos del 80 % y 95 % . . . . .	73
8.24. Pronóstico mensual de exportación de artículos de vestuario - intervalos del 80 % y 95 % . . . . .	78
8.25. Pronósticos mensual de importación de hierro y acero - intervalos del 80 % y 95 % . . . . .	81
C.1. Comercio bilateral entre Guatemala y Estados Unidos — periodo filtrado . . . . .	104
C.2. Comercio bilateral entre Guatemala y México — periodo filtrado . . . . .	105
C.3. Comercio bilateral entre Guatemala y Belice — periodo filtrado . . . . .	105

C.4. Comercio bilateral entre Guatemala y El Salvador — periodo filtrado . . . . .	106
C.5. Comercio bilateral entre Guatemala y Honduras — periodo filtrado . . . . .	107

El objetivo fue modelar el comercio internacional de Guatemala y pronosticar el comercio bilateral con Japón. De primero se aplicó el modelo de gravitación de comercio a las exportaciones e importaciones guatemaltecas en el periodo de 2002 a 2023. El modelo lo componen variables macroeconómicas, de gobernanza, socioculturales y geográficas. Se utilizó la pseudo máxima verosimilitud de Poisson (PPML), el análisis de panel de efectos fijos y el modelo de selección de muestra de Heckman para estimarlo.

El comercio se estudió en tres fases: con sus países vecinos (México, Belice, El Salvador y Honduras) y Estados Unidos, con los principales bloques comerciales a nivel continental (COMESA, TLCAN, MERCOSUR, ASEAN+3, UE y ANZCERTA) y nivel mundial. Se encontró que PPML fue eficiente para representar el comercio y que las variables macroeconómicas y socioculturales lo incrementaron, mientras que las variables de gobernanza y geográficas lo disminuyeron.

Debido a que solo la variante ingenua del modelo fue significativa, sumado a sesgos de selección, los resultados son una exploración preliminar del efecto que las variables tuvieron sobre el comercio internacional guatemalteco durante 2002 - 2023. Para mejorarlos se necesita la variante estructural compuesta de resistencias multilaterales, estas pueden ser aproximadas incrementando el periodo de estudio y ajustando las exportaciones e importaciones a *shocks* comerciales.

Para pronosticar el comercio bilateral con Japón se aplicaron los modelos autorregresivos ARIMA y SARIMA a los principales bienes distribuidos por la industria agropecuaria, manufactura y de extracción durante 2002 hasta 2024. Únicamente los resultados de la primeras dos fueron significativas, la exportación del café la modela ARIMA (0, 1, 3) (2, 1, 0)<sup>12</sup>, mientras que la exportación de artículos de vestuario con ARIMA (0, 1, 1) (2, 0, 0)<sup>12</sup>. Por su parte, la serie de tiempo de la importación de hierro y acero de la industria extractiva no contó con una tendencia útil para realizar las proyecciones. Los pronósticos son representativos a corto plazo, a partir de 2027 su incertidumbre crece. Se recomienda una actualización constante sobre la exportación de los bienes o utilizar otros métodos de estimación, como las redes neuronales, para generarlos.

The objective was to model Guatemala's international trade and forecast its bilateral trade with Japan. First, the gravity model of trade was applied to Guatemalan exports and imports from 2002 to 2023. The model comprises macroeconomic, governance, sociocultural, and geographic variables. The Poisson pseudo-maximum likelihood estimator (PPML), fixed effects panel analysis, and the Heckman sample selection estimator model were used.

Trade was studied in three phases: with its neighboring countries (Mexico, Belize, El Salvador, and Honduras) and the United States; with the main trade blocs at the continental level (COMESA, TLCAN, MERCOSUR, ASEAN+3, EU, and ANZCERTA); and at the global level. PPML was found to be efficient in representing trade, and macroeconomic and sociocultural variables increased it, while governance and geographic variables decreased it.

Because only the naive variant of the model was significant, coupled with selection bias, the results are a preliminary exploration of the effect that the variables had on Guatemalan international trade during 2002–2023. To improve these results, the structural variant composed of multilateral resistances is needed. These can be approximated by increasing the study period and adjusting exports and imports for trade *shocks*.

To forecast bilateral trade with Japan, the autoregressive ARIMA and SARIMA models were applied to the main goods distributed by the agricultural, manufacturing, and extractive industries from 2002 to 2024. Only the results of the first two models were significant: coffee exports are modeled by ARIMA (0, 1, 3) (2, 1, 0)<sup>12</sup>, while clothing items exports are modeled by ARIMA (0, 1, 1) (2, 0, 0)<sup>12</sup>. Meanwhile, the time series for iron and steel imports from the extractive industry lacked a useful trend for making projections. Forecasts are representative in the short term; their uncertainty increases from 2027 onward. Constant updates on export data are recommended, or alternative estimation methods, such as neural networks, should be used to generate these forecasts.

# CAPÍTULO 1

---

## Introducción

---

El comercio promueve el crecimiento y diversificación de un país. Comprender los factores que lo impulsan o frenan y pronosticar su trayectoria con socios internacionales puede ser útil para generar políticas públicas e inversión del sector privado en las principales industrias. Esta investigación es un punto de partida para comprender el comercio internacional de Guatemala durante el periodo de 2002 a 2023 a través de la Física.

De primero se estima el comercio internacional guatemalteco mediante el modelo de gravitación compuesto de variables macroeconómicas, de gobernanza, socioculturales y geográficas. Después se pronostica el comercio bilateral mensual a corto plazo de los principales productos de la industria agropecuaria, manufacturera y extractiva entre Japón y Guatemala a través de los métodos autorregresivos ARIMA y SARIMA.

En conjunto buscan responder: ¿Qué variables han sido relevantes para el comercio de Guatemala con sus países vecinos, principales bloques comerciales y a nivel mundial?, ¿Cómo incide la gobernanza de un país en el flujo comercial? y ¿Qué trayectoria seguirá el comercio bilateral con Japón en el futuro?

Para responderlas es necesario contextualizar al lector con los principales conceptos económicos utilizados durante la investigación (marco conceptual) y la conexión que tiene la Economía con la Física (marco teórico). Posteriormente se detallan las variables, modelos y pruebas realizadas (marco metodológico) para generar resultados individuales (sección de resultados) que nos permiten realizar inferencias del comportamiento del comercio internacional y bilateral guatemalteco (sección de discusión).

### 2.1. Objetivo general

Analizar y modelar el comercio de Guatemala a nivel mundial y con Japón.

### 2.2. Objetivos específicos

- Modelar el flujo comercial de Guatemala con sus países vecinos, principales bloques comerciales y a nivel mundial usando el modelo de gravitación de comercio.
- Pronosticar las exportaciones e importaciones de los productos más importantes, por industria, entre Japón y Guatemala usando los modelos autorregresivos ARIMA y SARIMA.
- Construir y analizar bases de datos.

## CAPÍTULO 3

---

### Justificación

---

La Física es una ciencia con múltiples aplicaciones, entre ellas la Economía. Esta rama se conoce como econofísica que, entre diversos usos, se encarga de describir y predecir el comportamiento de las economías y activos financieros aplicando los conceptos y metodologías de esta ciencia.

Esta investigación se enfoca en describir el comercio internacional de Guatemala aplicando un análogo de la ley de gravitación universal de Newton y pronosticar las exportaciones e importaciones entre Guatemala y Japón a través de modelos autorregresivos.

El primero cuantifica el impacto que variables macroeconómicas, de gobernanza, socioculturales y geográficas tuvieron sobre el desarrollo económico del país; el segundo, pronostica el valor esperado de las exportaciones e importaciones de los principales bienes por industria.

En conjunto explican el papel de Guatemala en la economía mundial. Adicionalmente, el último puede tener aplicaciones prácticas para inversores, empresas exportadoras y entidades públicas.

Debido a la temática de esta investigación, se definen los principales conceptos económicos y de comercio utilizados. En conjunto, son las bases de las siguientes secciones. Por lo tanto, se invita a darles una lectura, especialmente si no se encuentra familiarizado con esta ciencia social. La mayoría de los conceptos se recuperaron del libro *Principios de Economía* de Gregory Mankiw.

Idealmente todos deberían tener la capacidad de satisfacer sus necesidades básicas. Para esto, las sociedades producen objetos tangibles denominados bienes (como la comida) y actividades intangibles llamadas servicios (como la electricidad). Para utilizarlos, debe haber un intercambio entre compradores y vendedores conocido como comercio. Generalmente usando billetes y tarjetas como intermediarios; estas son una forma de dinero (Mankiw, 2012).

El dinero tiene tres funciones: ser un medio de cambio, una unidad de cuenta y un depósito de valor. La primera es ser un artículo que nosotros, como compradores, le entregamos a los vendedores a cambio de los bienes y servicios; la segunda es ser el medio usado para anunciar el precio o deuda de estos; y la tercera es la posibilidad de transferir el poder de compra del presente al futuro. Sobre el valor del dinero actual, este se establece por decretos gubernamentales y está respaldado por la confianza en los gobiernos; esto es el dinero fiduciario (Mankiw, 2012). Para Guatemala es el quetzal (Q).

La cantidad de bienes y servicios disponibles dependen de la oferta y la demanda. La oferta es la cantidad que los vendedores quieren y pueden vender; la demanda la cantidad que los compradores están dispuestos a comprar y tiene la capacidad de hacerlo. Idealmente ambas son inversamente proporcionales, la cantidad de un bien o servicio crece al aumentar su precio; sin embargo, la cantidad de demanda disminuye cuando el precio aumenta. Por lo tanto, ambas interactúan hasta conseguir un punto óptimo donde se maximiza la cantidad de bienes disponibles a un precio que mantenga la mayor demanda; este es el precio de equilibrio (Mankiw, 2012).

Los bienes y servicios provienen de diferentes sectores económicos. Este trabajo se centra en el agrícola, de extracción y manufacturero. El primero se especializa en la producción a gran escala de cultivos de plantas y ganadería (Gossett, 2023); el segundo en extraer los minerales y el carbón mediante la remoción de rocas y suelo superpuesto (Theilmann, 2024); el último en procesar esta materia prima para la producción (a gran escala o de manera artesanal) de bienes para su venta (Zimmer, 2022).

Vivimos en una economía abierta y de competencia perfecta. Existen varios compradores y ven-

dedores que ofrecen productos similares y ocurre el intercambio de bienes y servicios a través de las fronteras nacionales. Los bienes y servicios producidos en el extranjero que se venden en la economía doméstica se llaman importaciones, mientras que los producidos domésticamente que se venden en el extranjero son exportaciones (Mankiw, 2012).

Cada país registra sus exportaciones e importaciones. Entre los indicadores está la balanza comercial que es la diferencia entre el valor total de las exportaciones e importaciones. Si el valor de las exportaciones es mayor que el de las importaciones se llama un superávit comercial; contrariamente, si las importaciones sobrepasan las exportaciones se habla de un déficit comercial. Es importante mencionar que este déficit no implica que el país esté en desventaja, una mayor cantidad de importaciones puede estar relacionada a un mayor consumo e inversión en la economía doméstica (Mankiw, 2012).

Cuando el intercambio ocurre entre múltiples países se conoce como comercio internacional, si el intercambio de bienes y servicios sucede entre dos países específicos se llama comercio bilateral; si ambos producen y compran más, el comercio entre ellos aumenta. Sin importar el tipo, los dos son esenciales para medir el ingreso total de una nación. El principal indicador <sup>1</sup> es el Producto Interno Bruto (PIB) que mide dos cosas: el ingreso total de las personas en la economía y el gasto total en los bienes y servicios producidos en la economía. Mankiw lo define como: “El valor de mercado de todos los bienes y servicios finales producidos dentro de un país en un periodo determinado” (Mankiw, 2012, p. 494). Aquí el valor del mercado es el precio de equilibrio, los bienes y servicios finales son aquellos que han sido producidos para el consumo o uso final y no requieren más procesamiento, y el periodo determinado suele ser trimestral o anual (Mankiw, 2012).

El PIB se compone de cuatro partes: consumo, inversión, compras del gobierno y exportaciones netas. El primero es el gasto de los hogares en bienes y servicios; el segundo la compra de bienes que en un futuro se utilizarán para producir más bienes y servicios; el tercero el gasto de los gobiernos locales, estatales y federales en los mencionados; y el último es la balanza comercial (Mankiw, 2012). En conjunto:

$$Y = C + I + G + XN \quad (4.1)$$

Existen dos tipos: real y nominal. El real cuantifica la producción de bienes y servicios utilizando un precio constante (generalmente los precios en un año anterior) mientras que el nominal los cuantifica usando los precios actuales del mercado por lo que está susceptible al cambio de los precios (Mankiw, 2012).

Dado a que el comercio es esencial para el crecimiento económico y social de un país, se crean políticas que facilitan las exportaciones e importaciones. Concretamente los Tratados de Libre Comercio (TLC), estos acuerdos ocurren entre dos o más países que buscan aumentar su compraventa e inversión a través de la transparencia política y la eliminación de impuestos (Portal SAT, 2025).

Estos son necesarios para una integración económica. Además del comercio y capital, esta unión afronta los desafíos de la globalización, crisis económicas, cambio climático y contribuye a mantener la paz y estabilidad regional entre sus miembros (ESIC Business & Marketing School, s. f.). Gracias a esto se crean los bloques comerciales que es una agrupación más grande de países. En conjunto son una economía robusta que le permite establecer acuerdos y hacer negociaciones con países externos y otros bloques económicos (BBVA CIB, 2025).

---

<sup>1</sup>Otro indicador es el Producto Nacional Bruto (PNB) que es cuantifica el ingreso total ganado por los residentes permanentes de una nación (Mankiw, 2012).

## 5.1. Ley de gravitación universal

Para las personas apasionadas a la ciencia o que hayan recibido algún curso introductorio de Física, la ecuación de gravitación universal se les hará familiar. Esta fue propuesta por Sir Isaac Newton en 1687 en la proposición VII, teorema VII del tercer volumen de su libro *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (Principios Matemáticos de la Filosofía Natural). Abre la sección mencionando que “existe una fuerza de gravedad que tiende a todos los cuerpos, proporcional a las diversas cantidades de materia que contienen” (Newton, 1846, p. 397) <sup>1</sup>. Especifica que:

Todos los planetas gravitan mutuamente unos hacia otros, lo hemos demostrado antes [refiriéndose a su primer libro donde desarrolla diferentes principios]; así como también que las fuerzas de gravedad hacia cada uno de ellos, considerados por separado, son recíprocamente iguales al cuadrado de la distancia de los puntos desde el centro del planeta. Y de aquí (por la Proposición LXIX, Libro I, y sus Corolarios) se sigue que la gravedad que tiende hacia todos los planetas es proporcional a la materia que contienen (Newton, 1846, p. 397).

Estos son los fundamentos de la ley de gravitación universal. A diferencia de la ecuación actual, su planteamiento no menciona la Constante de Gravitación; esta se incluiría dos siglos después por el trabajo de diferentes científicos. Es necesario resaltar que en el enunciado anterior Newton menciona la ley del inverso cuadrado - también demostrada por él (Newton, 1846). Lo anterior se resume como:

$$F \propto \frac{Mm}{r^2} \tag{5.1}$$

Sus aportes revolucionaron la mecánica celeste. Su formulación logra predecir perturbaciones en el movimiento lunar y en las órbitas de Júpiter y Saturno, dar una explicación a las mareas oceánicas debido a la atracción gravitacional de la Luna y el Sol, analizar la órbita de cometas y planetas y determinar la relación de las masas del Sol, la Tierra, Júpiter y Saturno (Bhattacharya, 2006).

---

<sup>1</sup>A pesar de que el libro original data del siglo XVII, se utilizó su traducción al inglés de 1846 como referencia (Newton, 1846).

Sobre lo último, fue de interés para los astrónomos medir la densidad de la tierra. De esta forma, calcular la densidad de otros planetas y, por ende, sus masas. En 1772 la Royal Society crea el *Committee of Attraction* (Comité de Atracción) enfocado en determinar este valor (American Physical Society, 2008). Dos años después financian el experimento Schiehallion, que toma el nombre de la montaña escocesa donde se realizó.

Aquí Nevil Maskelyne pone a prueba la hipótesis del tercer libro de Newton para medir la densidad de la tierra. En síntesis, propone observar cómo una plomada se desviaba debido a la atracción gravitatoria de una montaña. Midiendo el ángulo de desviación y comparándolo con la densidad relativa de la montaña, era posible extrapolar la densidad de la Tierra (Mills, 2022). En 1778 Charles Hutton publicó los resultados, la densidad de la Tierra era 4.5 veces la del agua. También reportó la densidad del Sol, Mercurio, Venus, Marte, la Luna, Júpiter y Saturno (Hutton, 1778).

Sin embargo, Henry Cavendish desconfió de los resultados (American Physical Society, 2008). En 1789 publica su artículo *Experiment to determine the density of Earth*. Utilizando la balanza de torsión construida por John Michell, que llega a sus manos por Francis John Hyde Wollaston, con leves modificaciones logra medir la densidad (Cavendish, 1798).

Su balanza cuenta con un brazo de madera de 6 pies (1.82 m) originalmente suspendida de forma horizontal por un alambre delgado de cobre plateado de 40 pulgadas (1.06 m). A cada extremo del brazo cuelga una bola de plomo de 2 pulgadas (5.08 cm) de diámetro con masa de 11,263 granos <sup>2</sup> (0.73 Kg). Lo anterior fue resguardado por una caja de madera sostenida por postes fijados al suelo para protegerlo de corrientes de viento. Al costado de la caja se encuentra otro par de esferas de plomo de 2,439,000 granos (158.04 Kg) de masa suspendidas por varillas de cobre. La separación mínima entre el centro de ambos pares es de 8.85 pulgadas (22.48 cm) (Cavendish, 1798).

Con la necesidad de resguardarlo de otras fuentes de error, coloca la balanza en una habitación cerrada y oscura donde utiliza un telescopio para cronometrar su movimiento. Para esto, construye un vernier usando tiras de marfil; este tenía una precisión de una centésima de pulgada. Finalmente, lo coloca en cada esquina del brazo de madera. Para iluminar el interior utiliza lámparas con espejos convexos que apuntan al vernier (Cavendish, 1798). Gráficamente:

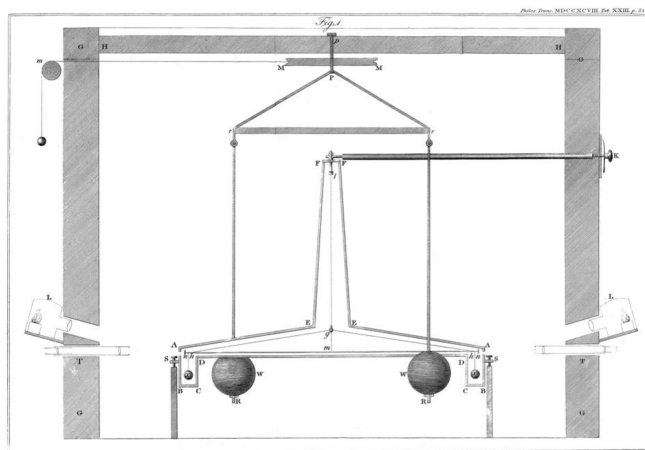


Figura 5.1. Ilustración de la balanza de torsión utilizada por Henry Cavendish (Cavendish, 1798)

Sobre su metodología, Cavendish nota una oscilación angular en el sistema <sup>3</sup>. Primero, él espera hasta que el sistema llegue al reposo; seguidamente, anota el ángulo de equilibrio. Después, mueve

<sup>2</sup>El *grano* fue una de las primeras medidas universales de masa, 1 Kg equivale a 15,432 granos. (The Editors of Encyclopaedia Britannica, 1998b)

<sup>3</sup>Esto es, de un lado hacia otro como se muestra en la simulación de dominio público "Cavendish Experiment Simulator": <https://prancer.physics.louisville.edu/modules/cavendish/simulator/index.html>

las esferas grandes al lado opuesto para comenzar una nueva oscilación. El nuevo “punto de reposo” es el promedio de las primeras tres amplitudes. Paralelamente, calcula el tiempo de vibración [N]. Este consiste en anotar el tiempo que tarda el brazo en regresar al punto medio entre la cresta y el valle de la oscilación, el semiperiodo, para después dividirlo por el número de vibraciones en ese intervalo (Cavendish, 1798).

Para calcular la densidad, modeló el sistema como un péndulo. Comienza encontrando la fuerza mínima para mover el brazo. Utilizando el tiempo de vibración, la longitud de arco entre las divisiones de la escala vernier y un péndulo con un periodo de oscilación de un segundo y 39.14 pulgadas (0.99 m) de longitud. De primero mide la distancia desde el centro de una esfera pequeña hasta el centro del brazo de madera: 36.65 pulgadas (Cavendish, 1798).

Después calcula el periodo de su oscilación de forma proporcional con el segundo péndulo. Seguidamente usa el ángulo de la separación entre la escala vernier:  $1/766$  y determina que para girar el brazo una pequeña división, se debe empujar cada esfera con una fuerza equivalente a una parte en  $818 \times N^2$  de su peso (Cavendish, 1798).

Finalmente, conociendo la fuerza ejercida por la Tierra sobre una bola pequeña y comparándola con la fuerza ejercida por una bola grande dedujo la densidad de la Tierra:  $\rho_E = N^2/10844B$ . Realizó 17 experimentos, encontró que la densidad media era  $5.48 \pm 0.038$  veces la del agua (equivalente a  $5.48 \pm 0.038 \frac{g}{cm^3}$ ) (Chang, 2007).

Indirectamente su estudio sentó las bases para calcular la Constante de Gravitación Universal. Distintos científicos visitan los procedimientos de Cavendish de donde resalta Charles Vernon Boys que en 1889 propone cambios estructurales de la balanza de torsión para mejorar su precisión. Redujo su tamaño y las masas utilizadas, sustituyó el alambre de cobre plateado por uno de fibra de cuarzo y mejoró la uniformidad en la temperatura del sistema (Boys, 1890).

En 1894 publica sus resultados en el artículo *On the Newtonian constant of gravity* donde encuentra que la densidad media de la Tierra es 5.5270 veces la del agua y la constante  $G = 6.6576E^{-8} \frac{cm^3}{g \cdot s^2}$  (Equivalente a  $6.6576E^{-11} \frac{m^3}{kg \cdot s^2}$  en el SI) (Boys, 1894).

Actualmente el valor aceptado por el Comité de Información para Ciencias y Tecnología (CODATA) es de:  $6.67408(31)E^{-11} \frac{m^3}{kg \cdot s^2}$ , con una incertidumbre de  $(4.7E^{-5})$  (Mohr et al., 2016). Mientras que el de la densidad media de la Tierra es  $5513 \frac{kg}{m^3}$  (NASA, s. f.). Finalmente, la Ley de gravitación universal de Newton se expresa:

$$F = G \frac{Mm}{r^2} \quad (5.2)$$

La gravedad se complementa por Albert Einstein en el siglo XX. Previamente el espacio y el tiempo fueron conceptos separados; sin embargo, avances en electromagnetismo y experimentos sobre la velocidad de la luz ponen a prueba las teorías existentes.

En 1915 Einstein publicó su teoría de relatividad general en el artículo *The Field Equations of Gravity*. En esencia describe que la gravedad está conectada al espacio y tiempo la cual se deforma en presencia de masa y energía (Tolish, 2010). Puso a prueba su teoría para resolver el problema de la precesión de la órbita de Mercurio donde fallaba la de Newton, pero fue hasta las observaciones del astrónomo Arthur Eddington donde se confirmó su teoría. Brevemente, durante un eclipse solar Eddington observó que la luz de una estrella se desvió al pasar cerca del Sol. Esto confirmó la curvatura del espacio-tiempo (Libretexts, 2024).

Sin embargo, para partículas lentas y de masa moderada, un sistema clásico, la nueva teoría se reduce a la de Newton para explicar cómo la masa responde y produce la gravedad. A diferencia de la ecuación anterior, esto se expresa a través de potenciales gravitacionales (Tolish, 2010).

Retomando, esta relación continúa apareciendo en otras ramas de la física; concretamente la ley inversa del cuadrado. En los cursos de electrodinámica tenemos: la ley de Coulomb, la ley de Biot-Savart y la ecuación de intensidad para algunos casos concretos (Sadiku, 2018). A pesar de ser tres ejemplos, las relaciones inversamente proporcionales a la separación de dos partículas o fuente de energía son frecuentes en esta rama de la ciencia.

## 5.2. Modelo gravitacional de comercio: siglo XX

Fue sorprendente descubrir que la ecuación de gravitación universal se usará en campos ajenos a la mecánica clásica. Concretamente en economía para estudiar el comercio bilateral, el impacto de tarifas comerciales, variabilidad del tipo de cambio, alianzas militares, etc (Lacaze, 2023). A este se le conoce como el modelo de gravitación de comercio. El orden de su evolución fue recuperado del artículo de María Lacaze *Los fundamentos conceptuales del modelo gravitacional de comercio: una revisión de la literatura* y el libro *The Gravity Model in International Trade* (Van Bergeijk et al., 2010).

La primera mención indirecta de este análogo ocurre en 1885. Ernst Ravenstein publicó *Laws of Migration* centrada en la migración del Reino Unido donde destaca que la falta de mano de obra es abastecida por una región con población redundante (Ravenstein, 1885). Probó que los migrantes recorren distancias cortas hacia centros industrializados y de comercio. Cuando la población rural se desplaza a estas urbes, deja un espacio vacío que llenarán los migrantes. Se repite este proceso mientras que migrantes de distancias más remotas, haciendo alusión a países vecinos, se desplacen paulatinamente para llenar estos espacios. Textualmente menciona que se debe a “la fuerza de atracción de las ciudades en rápido crecimiento” (Ravenstein, 1885, p. 199). Implícitamente, Ravenstein explica que el flujo migratorio es proporcional a la densidad poblacional de la ciudad de destino e inversamente proporcional a la distancia a recorrer.

En 1962 el físico y economista Jan Tinbergen hizo su primera formulación. En su libro *Shaping the world economy: suggestions for an international economic policy* estudia la desigualdad económica entre países desarrollados y en vías de desarrollo. Uno de sus análisis es el flujo comercial mundial en el apéndice VI de su libro, su objetivo es determinar los patrones que predicen el volumen comercial: exportaciones e importaciones. Explica que, si estos patrones están estandarizados, es más sencillo encontrar países que cuentan con tratados preferenciales o discriminatorios (Tinbergen, 1962).

En su primer modelo, las exportaciones se expresan por el Producto Nacional Bruto (PNB) del país importador y exportador, junto con la distancia entre ambos. Explica que la cantidad que un país puede suministrar depende de su tamaño económico; la cifra comprada por otro obedece el tamaño de su mercado, y el volumen comercial varía con los costos de transporte que asume está ligada con la distancia geográfica entre ambos países (Tinbergen, 1962). Concretamente:

$$E_{ij} = \alpha_0 Y_i^{\alpha_1} Y_j^{\alpha_2} D_{ij}^{\alpha_3} \quad (5.3)$$

Donde:

- $E_{ij}$  = exportaciones del país “i” al país “j”.
- $Y_i$  = PNB del país “i”.
- $Y_j$  = PNB del país “j”.
- $D_{ij}$  = distancia entre el país “i” y el país “j”.

El desconocimiento de los exponentes permite que no haya una proporcionalidad directa entre las exportaciones y las variables, también que la ley del inverso cuadrado no se cumpla como lo hace la teoría de Newton. Posteriormente reescribe su ecuación tomando el logaritmo para facilitar su análisis. Sobre estos aplica la regresión de mínimos cuadrados ordinarios (OLS) para determinar las constantes. Debido a limitaciones en el acceso de información, su análisis lo hace con el flujo comercial de materia prima (Tinbergen, 1962).

$$\log E_{ij} = \alpha_1 \log Y_i + \alpha_2 \log Y_j + \alpha_3 \log D_{ij} + \alpha'_0 \quad (5.4)$$

Donde:

$$\alpha'_0 = \log \alpha_0.$$

Por último, incluye variables indicadoras de factores políticos y geográficos para determinar si esto tiene un impacto en el comercio. La primera corresponde a la preferencia en el British Commonwealth <sup>4</sup>, la segunda a la preferencia de Benelux <sup>5</sup> y la tercera evidenciar si ambos países comparten una frontera. Estas variables son binarias que toman el valor 1 si ambas naciones comparten esta característica y 0 de lo contrario (Tinbergen, 1962).

$$\log E_{ij} = \alpha_1 \log Y_1 + \alpha_2 \log Y_j + \alpha_3 \log D_{ij} + \alpha_4 \log N + \alpha_5 \log P_C + \alpha_6 \log P_B + \alpha'_0 \quad (5.5)$$

Donde:

- $N$  = variable ficticia para países vecinos
- $P_C$  = variable ficticia para la preferencia de la Commonwealth
- $P_B$  = variable ficticia para la preferencia del Benelux

Sobre sus resultados, los valores predichos por el modelo no se ajustan a los reales. Afirma que esto es esperado porque se buscan variaciones en el comercio que le permita encontrar los países con mayor afinidad. También que la adición de las variables mencionadas dio mejores resultados reflejado por el coeficiente de correlación, aunque solo la preferencia Commonwealth fue estadísticamente significativo.

Cinco años después, en 1967, Hans Linnemann hace un análisis empírico para entender el flujo comercial entre países. En su artículo *An Econometric Study of International Trade flow* discute que la teoría existente en ese entonces, de ventaja comparativa <sup>6</sup>, fallaba en explicar el comercio bilateral; sólo es útil para casos concretos como el comercio entre países desarrollados y subdesarrollados (Linnemann, 1967).

Por lo tanto, crea su propio modelo sobre la potencial demanda y oferta de los bienes comerciales  $[X_{ij}]$ . Argumenta que la demanda del país “j” por los bienes del país “i” depende del PIB del país

<sup>4</sup>El British Commonwealth es un tratado internacional entre el Imperio Británico y sus excolonias. Su objetivo es promover la democracia, derechos humanos, el desarrollo sostenible e impulsar el comercio entre los miembros (Commonwealth Secretariat, s. f.).

<sup>5</sup>El Benelux es un convenio monetario entre Bélgica, los Países Bajos y Luxemburgo. Su objetivo es fortalecer las relaciones económicas entre los miembros; para esto, promueven la libre circulación de personas, bienes, capital, servicios, etc. (Benelux, 2023).

<sup>6</sup>En síntesis, la teoría de ventaja comparativa especifica que cada país debe especializarse en la producción de los bienes que se fabriquen con el menor costo de oportunidad en comparación con otros países. Esto significa que maximiza su comercio al reasignar sus recursos a los bienes donde el país es experto o tiene algún tipo de ventaja (geográfica, climática, tecnológica, etc.) (Obstfeld & Krugman, 2012).

“j” y su población. Para la oferta ocurre de forma similar intercambiando los países. Las variables usadas son: ambos PIB  $[Y_i, Y_j]$ , la población del país “i”  $[N_i]$ , la separación entre ambos  $[D_{ij}]$  y factores comerciales preferenciales  $[P_{ij}]$  (Linnemann, 1967). En conjunto:

$$X_{ij} = \sigma_0 Y_i^{\alpha_1} N_i^{-\alpha_2} Y_j^{-\alpha_3} D_{ij}^{-\alpha_5} P_{ij}^{\alpha_6} \quad (5.6)$$

Sus resultados se ajustan a los datos reales. Los coeficientes tienen los signos planteados en el modelo y son estadísticamente significativos. Resalta que la distancia reduce el comercio mientras que los tratados preferenciales, el French community <sup>7</sup> y nuevamente el British Commonwealth, lo estimulan. También observa que el comercio crece proporcionalmente al PIB, pero reitera que no implica causalidad. Finalmente, aborda problemas de heteroscedasticidad en los datos e introduce el proceso de integración económica como otra área de estudio con esta metodología (Linnemann, 1967).

En 1973 Norman Aitken aplica los modelos de Linnemann y Tinbergen. En su artículo *The Effect of the EEC and EFTA on European Trade: A Temporal Cross-Section Analysis* busca encontrar los factores que han moldeado el comercio europeo entre 1951 y 1967. Hace énfasis en los tratados European Economic Community (EEC) y el European Free Trade Association (EFTA), donde cada uno forma es un bloque comercial (Aitken, 1973).

Investiga sus efectos: la creación bruta de comercio, desviación de comercio y creación externa de comercio. El primero evalúa cómo aumenta el comercio entre los miembros de un bloque. El segundo, si los miembros obtienen sus importaciones de países externos al bloque debido a bajos costos de importación en contraste con ellos mismos. El tercero, similar al anterior, si todo el bloque comercial interactúa con países ajenos debido a más factores para lograr una integración económica (Aitken, 1973).

Los estudios empíricos previos fallaban en distinguir estos efectos. Por lo tanto, Aitken construye su modelo para las importaciones  $[X_{i,j}]$ . Este incluye: El PNB de ambos países  $[Y_i, Y_j]$ , sus poblaciones  $[N_i, N_j]$ , la distancia entre ambos  $[D_{i,j}]$ , su adyacencia  $[A_{i,j}]$  y las variables  $P^{EEC}$  y  $P^{EFTA}$  para el comercio entre los miembros de ambos bloques. A diferencia de los autores anteriores, él introduce el análisis de sección transversal en la metodología (Aitken, 1973).

$$\begin{aligned} \log X_{ij} = & \log b_0 + b_1 \log D_{ij} + b_2 \log Y_i + b_3 \log Y_j + b_4 \log N_i + \\ & b_5 \log N_j + b_6 \log A_{ij} + b_7 \log P_{ij}^{EEC} + b_8 \log P_{ij}^{EFTA} + \log \epsilon_{ij} \end{aligned} \quad (5.7)$$

Sobre lo encontrado, la mayoría de las variables se comportan correctamente. Tiene los signos esperados y son estadísticamente significativos. Sin embargo,  $P^{EEC}$  se vuelve significativa hasta 1961 y  $P^{EFTA}$  hasta 1964. Adicionalmente, Aitken hace proyecciones para medir los efectos mencionados dos párrafos atrás. Ambos bloques experimentan una creación bruta de comercio hasta 1964 donde el EEC tiene el mayor crecimiento, después ambos experimentan una desviación de comercio causada por una integración económica entre ambos (Aitken, 1973).

Gracias a las contribuciones de estos y demás autores la ecuación se popularizó. Sin embargo, seguía siendo un descubrimiento empírico. Fue hasta 1979 cuando James Anderson publicó *A Theoretical Foundation for the Gravity Equation*. En cuatro secciones reconstruye la ecuación y discute sus técnicas de estimación.

Comienza con el modelo del sistema de gastos puros. Asume que: cada país se especializa en la producción de un producto, no existen tarifas o costos de transporte, todos los países gastan la misma

<sup>7</sup>El French Community fue un tratado entre Francia y sus antiguas colonias. Se encargó de asuntos de política exterior y monetarias, defender a sus miembros e impulsar la educación superior. Estuvo vigente desde 1958 hasta 1979 (The Editors of Encyclopaedia Britannica, 1998a).

proporción de su capital en consumir los productos de un país “i” [ $b_i$ ] y los precios son constantes y normalizados; de esta forma, el ingreso del país “j” [ $Y_j$ ] es el determinante de las importaciones [ $M_{ij}$ ]. Además, el ingreso se asume que equivale a las ventas (Anderson, 1979):

$$M_{ij} = b_i Y_j \quad (5.8)$$

Donde:

$$Y_i = b_i \left( \sum_j Y_j \right) \quad (5.9)$$

Sustituyendo:

$$M_{ij} = \frac{Y_i Y_j}{\sum_j Y_j} \quad (5.10)$$

Continua con el modelo del sistema de intercambio de gastos. Expande el anterior notando que el comercio varía entre regiones y países debido a sus ingresos y población. El primero es un factor de la demanda de importaciones; el segundo, de su oferta. Además, asume que cada país produce bienes comerciales y no comerciales (consumidos localmente); Anderson se enfoca en los bienes comerciales. Explica que los consumidores, la población, deciden de qué país comprar sus productos. De sus ingresos [ $Y_j$ ], destinan una cantidad para obtener bienes importados [ $\phi_j$ ]. Donde una fracción de esta se asigna a los productos del país “i” [ $\Theta_i$ ] (Anderson, 1979).

$$M_{ij} = \Theta_i \phi_j Y_j \quad (5.11)$$

Expandiendo el análisis y tras diferentes sustituciones:

$$M_{ij} = \frac{\phi_i Y_i \phi_j Y_j}{\sum_i \sum_j M_{ij}} \quad (5.12)$$

Después abordando la eficiencia de estimación, el método OLS puede causar sesgos debido a problemas de endogeneidad. Esto es, las variables del modelo pueden estar correlacionadas con el término de error de la ecuación. Anderson propone que los ingresos destinados a las importaciones,  $\phi_i$ , sean una función de los ingresos del país y su población, contar con restricciones de equilibrio comercial y utilizar el método de ingreso rezagado <sup>8</sup> (Anderson, 1979).

Finalmente explica que los países comercian más bienes, existen tarifas, costos de transporte y separaciones geográficas; estos factores generan más sesgos. Comienza analizando la adición de bienes, aquí encuentra un análogo al modelo del sistema de intercambio de gastos. Posteriormente especifica que los costos de transporte son una función de la distancia y concluye explicando que estas consideraciones pueden crear modelos capaces de gestionar aranceles y el efecto que tienen cambios políticos (Anderson, 1979).

Seis años después, en 1985, Jeffrey Bergstrand hace nuevas contribuciones a los fundamentos. Construye la ecuación analizándola desde la demanda, oferta y equilibrio. Sobre la demanda, supone que los consumidores tienen una función de utilidad con elasticidad de sustitución constante (CES). Esto implica que la facilidad con la que los consumidores sustituyen sus bienes nacionales por importados puede diferir de la facilidad con la que sustituyen entre importaciones provenientes de distintos países. Sobre la oferta, cada país tiene una función de producción con elasticidad de transformación

<sup>8</sup>En síntesis, al contar con el comportamiento histórico de las variables (PIB, población, etc.), es posible utilizar sus valores pasados, como el PIB del año anterior, como herramienta para estimar el comercio actual. Esta evita problemas de endogeneidad. (Anderson, 1979)

constante (CET). Esto les permite a las industrias reasignar su producción entre el mercado interno y el externo, así como redirigir sus exportaciones hacia diferentes destinos (Bergstrand, 1985).

Su enfoque en equilibrio tiene diferentes supuestos. Primero, el comercio bilateral entre los países “i” y “j” es pequeño en comparación al comercio mundial, esto evita variaciones en los precios globales; segundo, todos los países tienen la misma estructura de utilidad y producción<sup>9</sup>; por último, no existe preferencia por el origen de los productos, no hay impuestos ni costos de transporte y los precios son estandarizados. Considerando lo anterior, realiza un estudio con los datos de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD) en los años 1965, 1966, 1975 y 1976 donde encuentra que si existe preferencias por el país de origen y que los precios y tipos de cambio afectan el flujo comercial (Bergstrand, 1985).

10 años más tarde, en 1995, John McCallum aborda la significancia de las fronteras entre países vecinos en su artículo *National Borders Matter: Canada-U.S. Regional Trade Patterns*. Estima que su impacto en el comercio de países culturalmente similares es menor que en el comercio de dos países que no lo son. En su estudio para el comercio entre las provincias canadienses y los estados estadounidenses en 1988, que asume similares, realiza diferentes configuraciones de la ecuación de gravitación; una de ellas es un mundo sin fronteras. En sus pruebas encuentra que esta última sobreestima las exportaciones en todos los casos; por ende, las fronteras son significativas. Sin embargo, su estudio comienza una nueva área de discusión conocida como el *dilema de las fronteras* o *border puzzle* (McCallum, 1995).

Esto concluye los avances durante el siglo XX. El resto de los estudios durante la década de los noventa citan los artículos de Anderson y Bergstrand (Lacaze, 2023). Resumiendo, Jan Tinbergen fue el primero en aplicar empíricamente la ecuación de gravedad al comercio, Hans Linnemann propuso una versión derivada de la oferta y demanda y encuentra problemas de heteroscedasticidad en los datos, Norman Aitken aplicó el análisis de sección transversal, James Anderson ofreció los primeros fundamentos microeconómicos, Jeffrey Bergstrand los amplía suponiendo un caso ideal y John McCallum introduce el *border puzzle*.

### 5.3. Modelo gravitacional de comercio: siglo XXI

En 2003 regresa James Anderson junto a Eric van Wincoop con nuevas contribuciones a los fundamentos. En su artículo *Gravity with Gravitas: A solution to the border puzzle* desarrollan un método consistente para estimar la ecuación de gravedad y calcular el efecto que tienen las variables en el comercio. Argumenta que los resultados anteriores están sesgados debido a la falta de variables de resistencia multilateral (Anderson & Van Wincoop, 2003).

Comienzan analizando los resultados de McCallum. Expresan que el modelo utilizado no logra explicar el comercio nacional e internacional; carece de resistencia multilateral y analiza dos economías de tamaños diferentes. Por esto, en su análisis agregan las variables correspondientes al comercio interprovincial y al comercio interestatal. Tras diferentes configuraciones usando estas variables encuentran que el comercio interprovincial es 16.4 veces el comercio entre estados y provincias en contraste con las 22 veces reportadas por McCallum. También que el comercio interestatal es 1.5 veces el comercio entre estados y provincias. Por ende, concluyen que los resultados de 1995 están sobreestimados y que su modelo resuelve el *border puzzle* (Anderson & Van Wincoop, 2003).

Ambos expanden los aportes individuales de Anderson de 1979. Retoman el concepto de elasticidad de sustitución constante (CES) y agregan resistencias de comercio entre los países. Asumen que: todos los productos se diferencian por el lugar de origen y cada país se especializa en la producción de uno solo, los consumidores tienen la misma demanda que se aproxima con una función de utilidad de CES, los costos comerciales son cubiertos por el país exportador, existe una limpieza de mercado

<sup>9</sup>Una función de utilidad de CES y producción CET.

donde la demanda es igual a la oferta y el índice de precios [P] es una función de barreras y acciones comerciales (Anderson & Van Wincoop, 2003).

Además de algunas de las variables convencionales, su modelo implementa: barreras comerciales [ $t_{ij}$ ] (como la distancia), el ingreso nominal mundial [ $y^W$ ], la elasticidad de sustitución entre todos los bienes [ $\sigma$ ] y el índice de precios para el país “i” y “j” [ $P_i, P_j$ ]; estos últimos son las variables de resistencia multilateral (Anderson & Van Wincoop, 2003).

$$x_{ij} = \frac{y_i y_j}{y^W} \left( \frac{t_{ij}}{P_i P_j} \right)^{1-\sigma} \quad (5.13)$$

Gracias a esta y demás contribuciones, se expande el uso de la ecuación. A finales de la década de los 2000 otros autores encuentran que los efectos fijos de los importadores y exportadores pueden utilizarse para contener la resistencia multilateral. Esto genera nuevos estudios consistentes con la teoría, especialmente la unificación de empresas heterogéneas con el flujo comercial bilateral. La ecuación se utilizó para estimar el efecto que un *shock* comercial (como tratados, tarifas, guerras, etc) tiene sobre la cantidad de productos que ya se comerciaban antes (margen intensivo) y el efecto en la aparición de nuevos productos y nuevas relaciones comerciales (margen extensivo) (Head & Mayer, 2014).

Debido a los avances fue necesario clasificar la ecuación. En 2014 Keith Head y Thlerry Mayer lo hacen en *Gravity Equations: Workhorse, Toolkit, and Cookbook*. Aquí dan tres definiciones de la ecuación de gravedad: general, estructural e ingenua. Comenzando con la general, explican que todos los términos son multiplicativos y que no debe haber intervención de terceros países en el comercio bilateral, si la hay es necesario que se incluya en las resistencias multilaterales. Sobre su forma:  $S_i$  es la capacidad de exportación,  $M_n$  las características que promueven la importación,  $\phi_{ni}$  la accesibilidad de comercio entre el país “i” y “n” y G es una constante (Head & Mayer, 2014).

$$X_{ni} = GS_i M_n \phi_{ni} \quad (5.14)$$

La estructural corresponde a la mayoría de los modelos. Implementa las resistencias multilaterales para realizar cálculos más completos, esto le permite estimar el comercio a nivel agregado (sin distinguir entre tipos de bienes o sectores [comercio total]) o a nivel sectorial (distinguiendo categorías o sectores específicos). Se compone de el: valor de producción [ $Y_i$ ], valor del gasto del importador en todos los países de origen [ $X_n$ ], las resistencias multilaterales  $\Omega_i$  y  $\Phi_n$  (análogos de  $S_j$  y  $M_n$ ) y  $\phi_{ni}$ . Por último, es necesario resaltar que habitualmente se usa el PIB de ambos países para aproximar  $Y_i$  y  $X_n$  (Head & Mayer, 2014):

$$X_{ni} = \frac{Y_i X_n}{\Omega_i \Phi_n} \phi_{ni} \quad (5.15)$$

Finalmente, el modelo ingenuo es útil para fines pedagógicos. Es más general y restrictivo que el resto, no cuenta con resistencias multilaterales y la información de accesibilidad de comercio entre los países se asume constante. Su estructura corresponde a la de Tinbergen (Head & Mayer, 2014).

$$X_{ni} = GY_i^a Y_n^b \phi_{ni} \quad (5.16)$$

Los avances en los fundamentos encontraron tres errores de estimación: el error de la medalla de oro, medalla de plata y medalla de bronce; los nombres se deben a su importancia. El primero explica que el uso de log PIB como una aproximación para log  $S_i$  y log  $M_n$  omite las resistencias multilaterales, estos están correlacionados con los costos comerciales; por lo tanto, la estimación está sesgada. El segundo, promediar el flujo comercial entre ambos países; se aconseja tratarlos

individualmente: el flujo del país “i” al “j” y del “j” al “i”. El último, ajustar erróneamente el efecto de la inflación (World Trade Organization, 2012).

Para contrarrestarlos se recomienda: realizar análisis de panel de datos para estimar la ecuación estructural, hacerlo en intervalos de 3,4 o 5 años para que el comercio se ajuste a políticas comerciales, (si es posible) contar con información del comercio nacional, incluir efectos fijos por país y año para capturar las resistencias multilaterales y otras variables no observadas; por último, estimar utilizando la pseudo máxima verosimilitud de Poisson (PPML) en vez de mínimos cuadrados ordinarios (OLS) (Yotov et al., 2016).

Con esto concluyen los principales avances. Se consideró necesario resumir parte de su historia para contextualizar al lector sobre el vínculo entre la ley de gravitación universal y la economía junto a los avances que ha experimentado durante las últimas décadas. Se hizo hincapié en los objetivos, modelos y resultados de las investigaciones para identificar las áreas de estudio donde puede aplicarse. De esta forma, justificar su uso en la investigación para optar al título de Licenciado en Física.

## 5.4. Estudio I: comercio internacional de Guatemala a través de la ecuación de gravitación

Partiendo de esa motivación, esta investigación se enfoca en analizar el comercio internacional y bilateral de Guatemala a través del modelo gravitacional en el período de 2002 a 2023.<sup>10</sup> Una exploración preliminar de los datos muestra que el comercio es directamente proporcional a los PIB de los países e inversamente proporcional a la distancia entre ambos como se muestra en la Cuadro 5.1:

Cuadro 5.1. Matriz de correlación entre variables (elaboración propia)

	Comercio	Distancia	PIB Importador	PIB Guatemala
Comercio	1.000000	-0.355259	0.626197	0.125588
Distancia	-0.355259	1.000000	0.205985	0.004407
PIB Importador	0.626197	0.205985	1.000000	0.147007
PIB Guatemala	0.125588	0.004407	0.147007	1.000000

Para identificar su evolución durante las últimas décadas se graficó la proporcionalidad que tuvo el comercio total de Guatemala<sup>11</sup> con el PIB y la distancia de separación entre ambos países durante el periodo de 2002 – 2006 (Figuras 5.2 y 5.3), 2002 – 2010 (Figuras 5.4 y 5.5), 2002 – 2014 (Figuras 5.6 y 5.7), 2002 – 2018 (Figuras 5.8 y 5.9) y 2002 – 2023 (Figuras 5.10 y 5.11). Se deduce que, a mayor PIB, mayor comercio; a mayor distancia, menor comercio. Esto está en línea con el comportamiento propuesto por Newton si se sustituye la fuerza por el comercio y las masas por ambos indicadores económicos.<sup>12</sup>

Como ejemplo ilustrativo de la teoría, el comercio entre Guatemala y México será mayor que el comercio entre Guatemala y Argentina, porque México es una economía más grande y tiene la menor separación al compartir frontera, lo que reduce los costos de transporte.

<sup>10</sup>Las bases de datos utilizadas se encuentran en el siguiente repositorio:[https://drive.google.com/file/d/1c\\_xngfLKMGOkQ-AdrQjbynU7QG4VXRmz/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1c_xngfLKMGOkQ-AdrQjbynU7QG4VXRmz/view?usp=sharing)

<sup>11</sup>suma de las exportaciones e importaciones totales

<sup>12</sup>La idea de presentar ambas gráficas se obtuvo de *The gravity model of international trade: a user guide* (Shepherd, Doytchinova & Kravchenko, 2019)

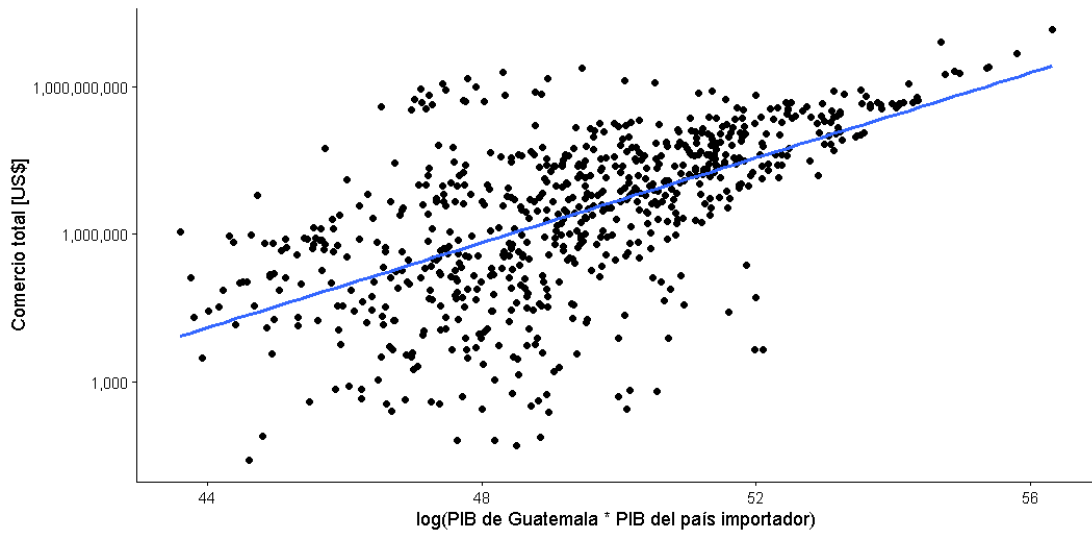


Figura 5.2. Relación entre el comercio internacional total de Guatemala y el producto de ambos PIB durante 2002 - 2006 (elaboración propia)

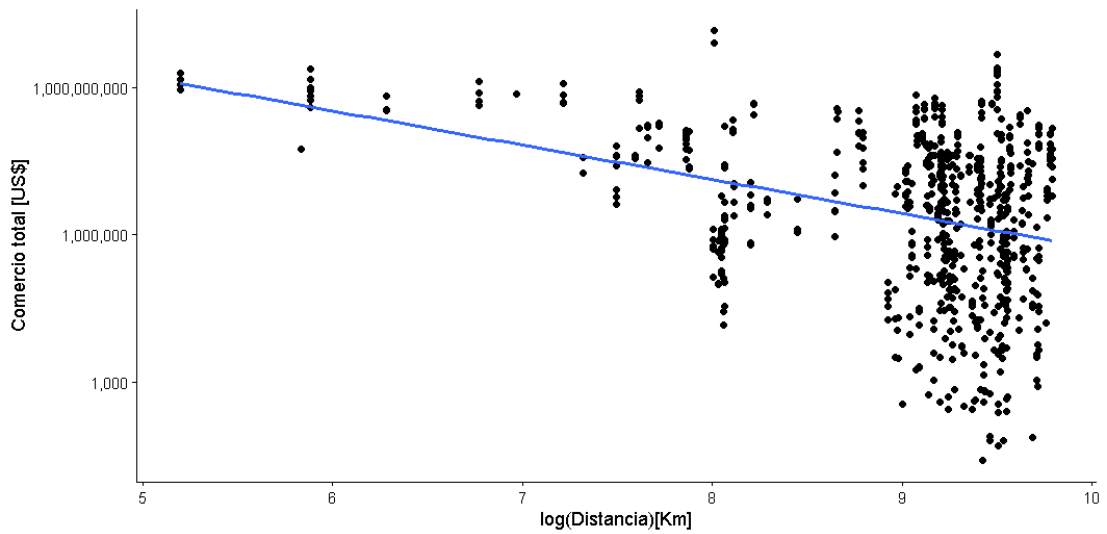


Figura 5.3. Relación entre el comercio internacional total de Guatemala y la distancia durante 2002 - 2006 (elaboración propia)

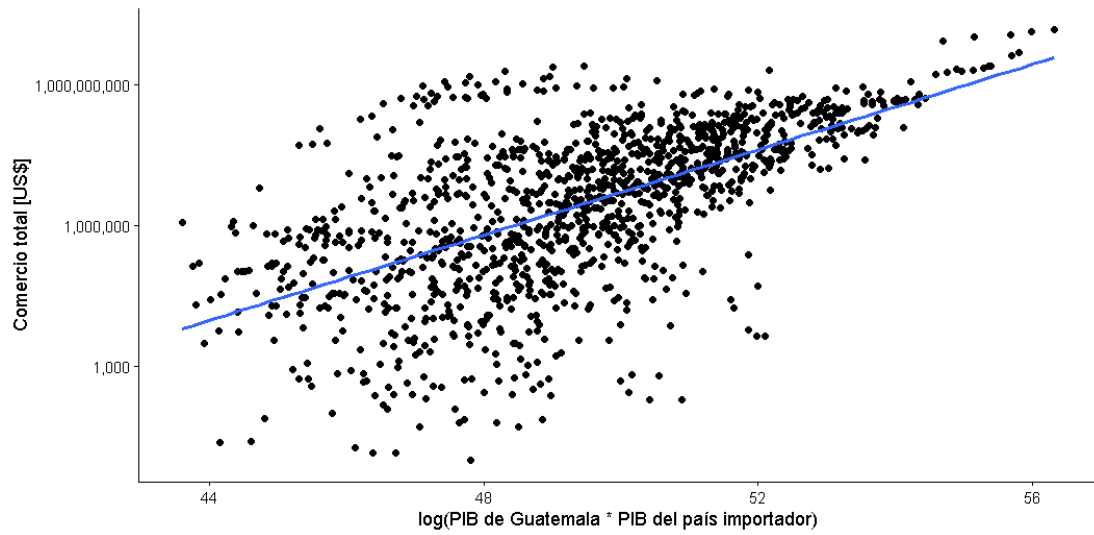


Figura 5.4. Relación entre el comercio internacional total de Guatemala y el producto de ambos PIB durante 2002 - 2010 (elaboración propia)

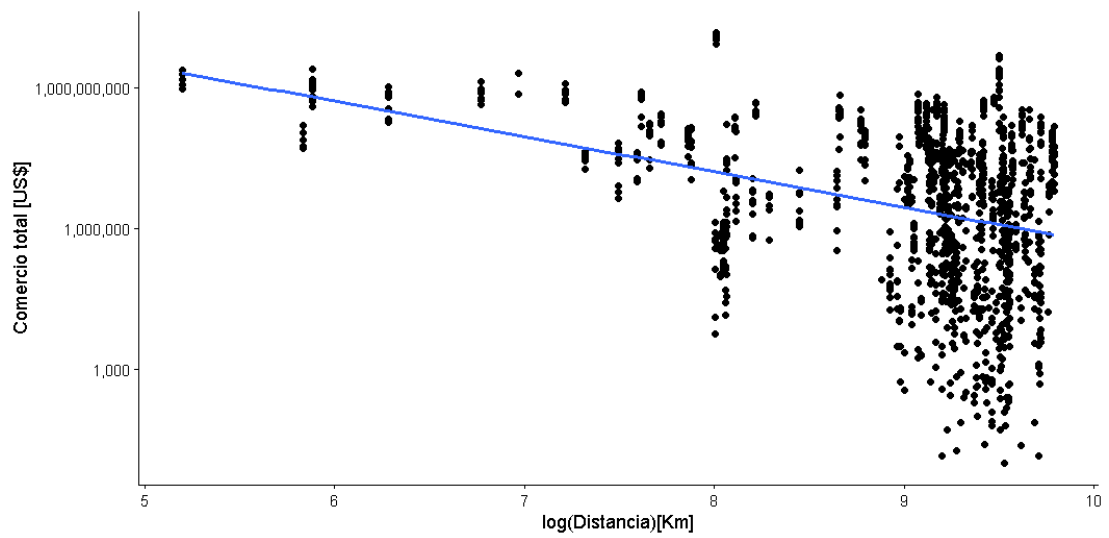


Figura 5.5. Relación entre el comercio internacional total de Guatemala y la distancia durante 2002 - 2010 (elaboración propia)

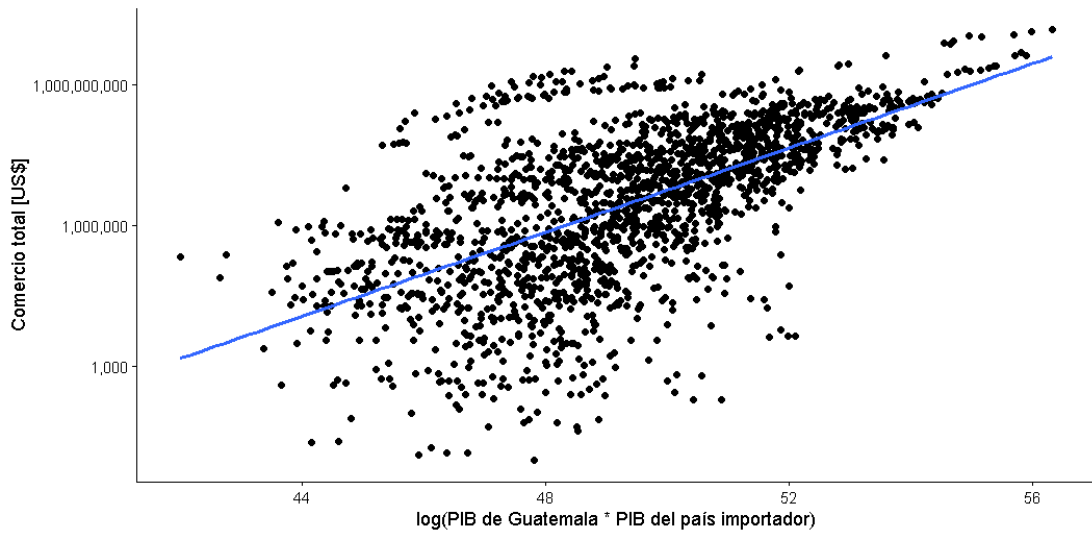


Figura 5.6. Relación entre el comercio internacional total de Guatemala y el producto de ambos PIB durante 2002 - 2014 (elaboración propia)

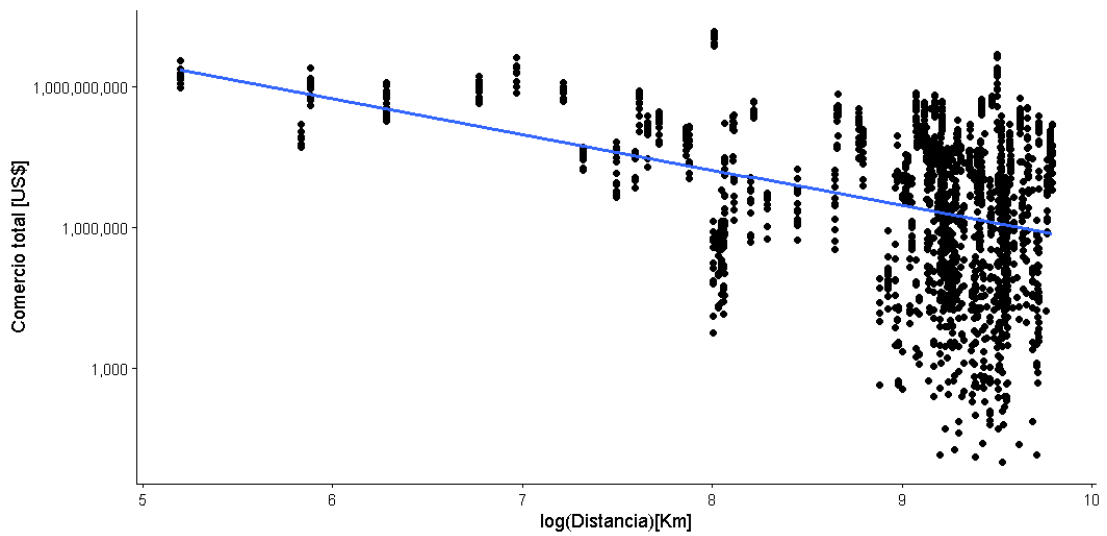


Figura 5.7. Relación entre el comercio internacional total de Guatemala y la distancia durante 2002 - 2014 (elaboración propia)

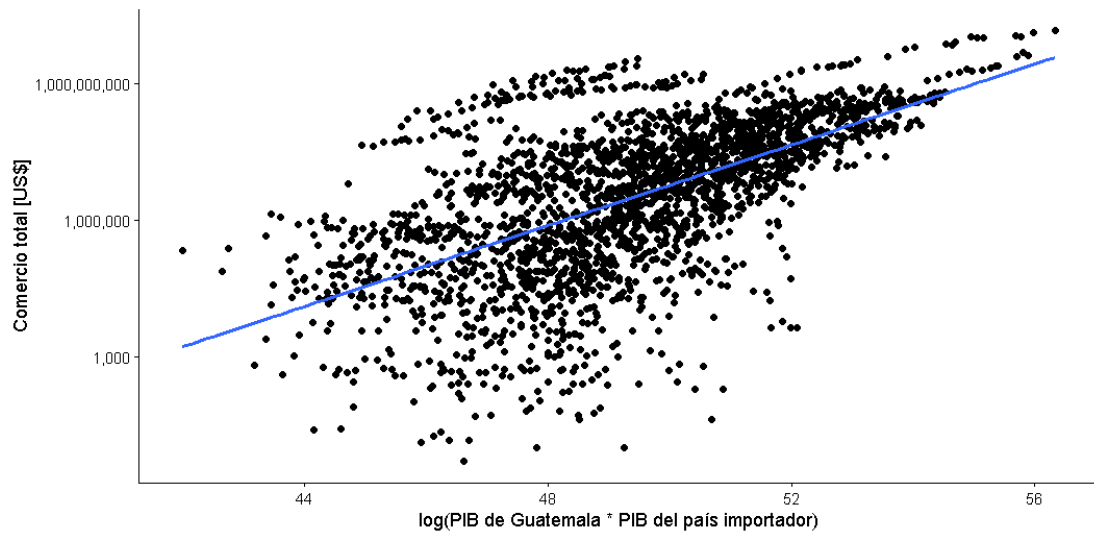


Figura 5.8. Relación entre el comercio internacional total de Guatemala y el producto de ambos PIB durante 2002 - 2018 (elaboración propia)

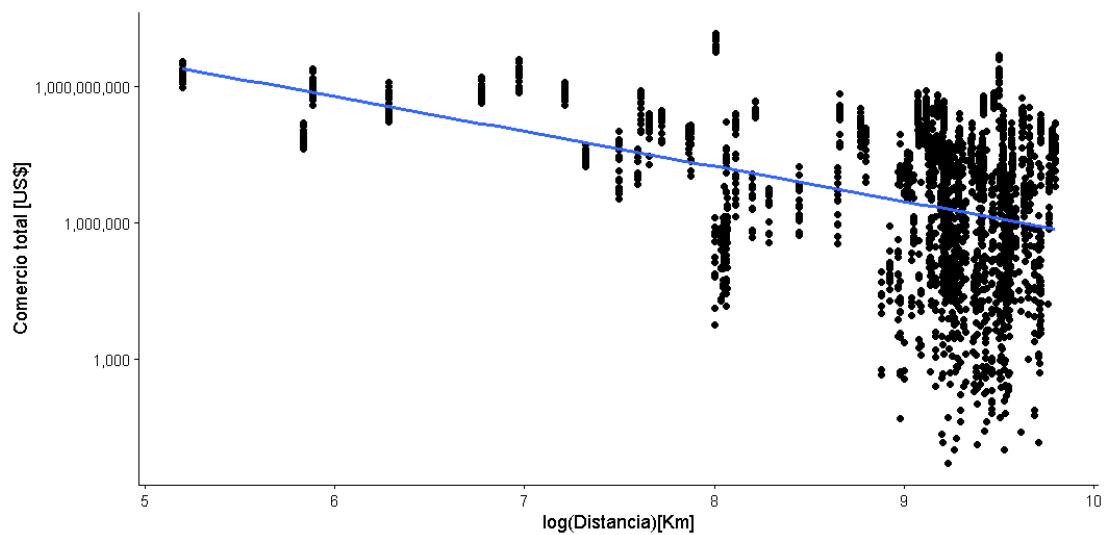


Figura 5.9. Relación entre el comercio internacional total de Guatemala y la distancia durante 2002 - 2018 (elaboración propia)

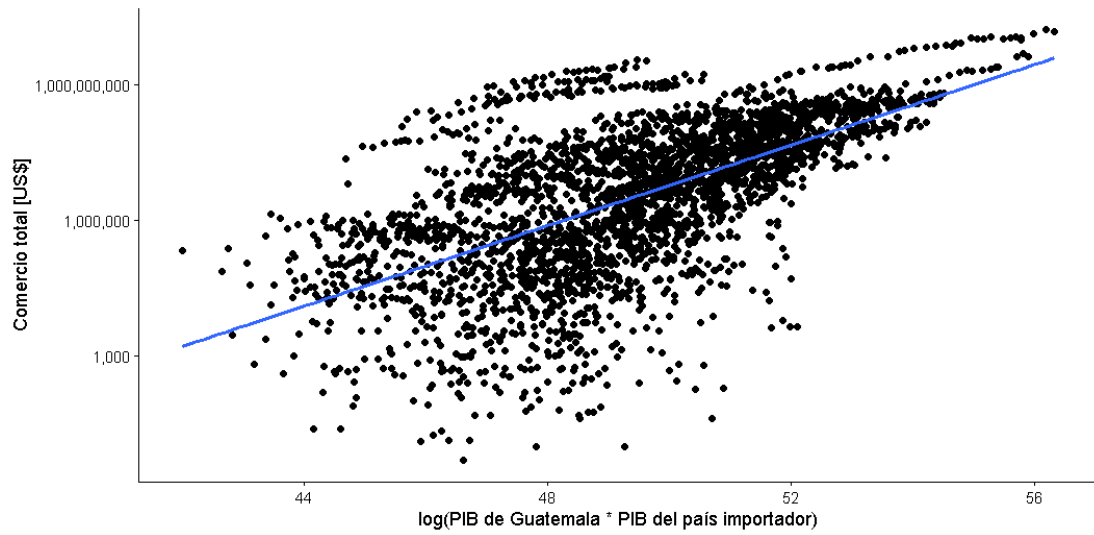


Figura 5.10. Relación entre el comercio internacional total de Guatemala y el producto de ambos PIB durante 2002 - 2023 (elaboración propia)

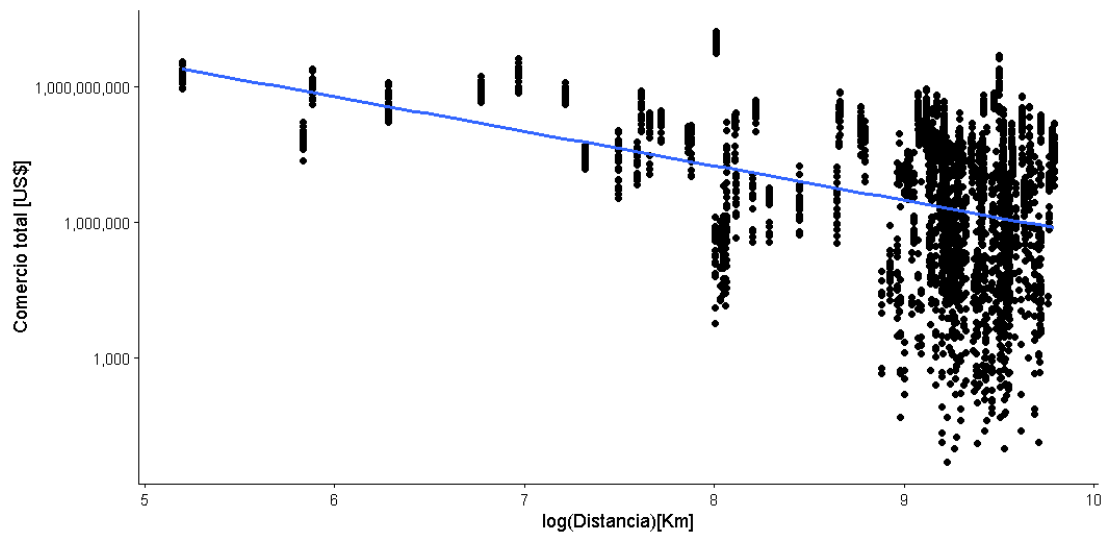


Figura 5.11. Relación entre el comercio internacional total de Guatemala y la distancia durante 2002 - 2023 (elaboración propia)

Esta no es la primera vez que se aplica el modelo en Guatemala. Resaltan los estudios de Melvin Mendoza: *Evaluación del impacto del Tratado del Libre Comercio (DR-CAFTA) sobre el flujo comercial de Guatemala.*, y el de Gabriel Fuentes: *Patrones, determinantes y potencial del comercio internacional de Guatemala: un modelo gravitacional*. El primero analiza 17 países, encuentra que el DR-CAFTA redujo las exportaciones un 53.7% (Mendoza, 2018). El segundo analiza 30, concluye que el comercio entre Guatemala y América es interindustrial donde hay un intercambio de bienes de diferentes sectores (Fuentes, 2025).

A diferencia de los anteriores, esta investigación busca analizar el comercio nacional a nivel mundial. Se recopiló la información de 200 países, estados e islas. El propósito es identificar las variables que estimulan e interfieren en el comercio bilateral.

### 5.4.1. Etapas de investigación

El análisis será inductivo a través de tres etapas: el comercio con países vecinos, con los principales bloques comerciales a nivel continental <sup>13</sup> y a nivel mundial. En la primera etapa se estudiaría el comercio de Guatemala con Estados Unidos, México, Belice, El Salvador y Honduras.

En la segunda, el comercio con los miembros del Mercado Común para África Oriental y Meridional (COMESA) en África; el Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN) y el Mercado Común del Sur (MERCOSUR) en América; la Asociación de Naciones de Asia Sudoriental más 3 (ASEAN + 3) en Asia; la Unión Europea (UE) en Europa; y el Acuerdo comercial para estrechar las relaciones económicas entre Australia y Nueva Zelanda (ANZCERTA) en Oceanía. Finalmente, a nivel mundial se integran estos y los demás países faltantes. A continuación se presenta un resumen de los países y bloques.

Al norte se encuentran Estados Unidos y México. Ambos son una república federal con una población estimada de 335 millones de habitantes para el primero y 130 millones para el segundo. Según datos del Banco Mundial, para 2023 el PIB estadounidense fue de 27.72 billones de dólares mientras que el mexicano de 1.79 billones. En el periodo de 2020 a 2023 el crecimiento de este indicador fue de 1.15% para Mex. y de 2.32% para los EE. UU. Sus economías se sostienen, en diferente medida, por la prestación de servicios (financieros y tecnológicos), la industria manufacturera, agropecuaria y energética (The Editors of Encyclopaedia Britannica, 2025b) (The Editors of Encyclopaedia Britannica, 2025c). Ambas son economías fuertes a nivel mundial siendo Estados Unidos la primera. Estados Unidos tiene relación con Guatemala gracias al tratado de libre comercio DR-CAFTA desde 2006 (U.S. Customs and Border Protection, 2023). México con el Tratado de Libre Comercio entre los estados unidos mexicanos y las Repúblicas de Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras y Nicaragua (Ministerio de Economía, s. f.).

Junto a nosotros está El Salvador, Honduras y Belice. El Salvador y Honduras son repúblicas constitucionales mientras que Belice es una democracia parlamentaria. Según el Banco Mundial, para el 2023 la población del primero fue de 6.31 millones, la del segundo 10.6 millones y la del tercero 411 mil habitantes. El tamaño de la economía salvadoreña fue de 34 mil millones de dólares, la hondureña de 34.4 mil millones y la beliceña de 3.1 mil millones. El crecimiento de los PIB entre 2020 y 2023 fue de 2.58%, 2.83% y 3.66%; respectivamente. Sobre sus economías, todas se sostienen por la industria agrícola y manufacturera (The Editors of Encyclopaedia Britannica, 2025a) (The Editors of Encyclopaedia Britannica, 2025d) (The Editors of Encyclopaedia Britannica, 2025e). Finalmente, tanto El Salvador como Honduras son miembros del DR-CAFTA mientras que nuestra relación con Belice es a través del Acuerdo de Alcance Parcial entre el Gobierno de la República de Guatemala y el Gobierno de Belice de 2006 (Ministerio de Economía, s. f.).

En 1994 se crea el COMESA. Lo integra 21 miembros: Burundi, Comoras, la República Democrática del Congo, Yibuti, Egipto, Eritrea, Esuatini, Etiopía, Kenia, Libia, Madagascar, Malawi,

<sup>13</sup>A excepción de la Antártida.

Mauricio, Ruanda, Seychelles, Somalia, Sudán, Túnez, Uganda, Zambia y Zimbabue. Entre sus objetivos está formar un mercado más amplio y competitivo, aumentar la productividad industrial y agrícola, explotar racionalmente sus recursos naturales, crear nuevas políticas monetarias y financieras y mejorar las infraestructuras de transporte y comunicación entre ellos. En conjunto ocupan dos tercios del continente africano, cuentan con 640 millones de habitantes, generan un PIB de un billón de dólares y un comercio mundial de 338 mil millones de dólares (Common Market for Eastern and Southern Africa, 2024).

El TLCAN estuvo en vigor entre 1994 y 2020, posteriormente fue sustituido por el Tratado entre Estados Unidos, México y Canadá (T-MEC). Ambos tuvieron como principales objetivos: eliminar las barreras comerciales, aumentar las oportunidades de inversión entre los miembros y la protección de la propiedad intelectual de los tres (Canada, 2016) (Office of the U.S. Trade Representative, s.f.). Sobre los resultados, Canadá aumentó sus exportaciones un 166 % y sus importaciones en 150 %, EE. UU. argumenta que el tratado tuvo un impacto insignificante en su PIB anual y México aumentó limitadamente sus importaciones estadounidenses (Floyd, 2025). Debido a esto, junto a otras razones, en 2020 se replantea el TLCAN y se forma el T-MEC buscando impactos más significativos entre los miembros.

En 1991 se fundó el MERCOSUR. Generalmente lo componen 13 miembros: Argentina, Bolivia, Brasil, Paraguay, Uruguay, Venezuela, Chile, Colombia, Ecuador, Guyana, Panamá, Perú y Surinam. Sin embargo, debido a tensiones políticas, Bolivia y Venezuela se encuentran suspendidos. El tratado busca eliminar las restricciones arancelarias entre los miembros, reestructurar las políticas económicas de cada uno para crear nuevas que promuevan una competencia justa entre ellos y establecer un arancel común para las importaciones de países externos al bloque. Sobre su impacto, en 2023 el comercio entre los miembros del bloque (intrazona) fue de 47 mil millones de dólares mientras que el comercio fuera del bloque (extrazona) fue de 669 mil millones de dólares teniendo como principales destinos China, la Unión Europea y Estados Unidos (MERCOSUR, 2024).

En diciembre de 1997 se establece la ASEAN + 3. Originalmente, en 1967, estuvo conformado por 10 miembros (ASEAN); actualmente cuenta con 13: Brunéi, Camboya, China, Corea del Sur, Filipinas, Indonesia, Japón, Laos, Malasia, Myanmar, Singapur, Tailandia y Vietnam. Entre sus objetivos están: promover el comercio y la inversión, mantener la estabilidad del mercado financiero en Asia, cooperar en el desarrollo de la industria (agropecuario, forestal, minera y energética) y promover el desarrollo de las micro, pequeñas y medianas empresas. En 2019 su comercio total fue de 890 mil millones de dólares y la inversión extranjera de China, Japón y Corea del Sur sobre los miembros de la ASEAN fue de 32 mil millones de dólares (ASEAN Secretariat, 2025).

Tras la Segunda Guerra Mundial se instaura la UE. La forma 27 miembros: Alemania, Austria, Bélgica, Bulgaria, Chequia, Chipre, Croacia, Dinamarca, Eslovaquia, Eslovenia, España, Estonia, Finlandia, Francia, Grecia, Hungría, Irlanda, Italia, Letonia, Lituania, Luxemburgo, Malta, Países Bajos, Polonia, Portugal, Rumanía y Suecia. Su objetivo fue promover la democracia y proteger los derechos humanos; posteriormente realizar una integración económica en el continente, proteger el medio ambiente, impulsar el progreso científico, etc. En 2023 contó con una población de 448 millones de habitantes y un PIB de 17 billones de euros. El bloque es el mayor exportador de productos manufactureros y de servicios a nivel mundial teniendo como principales socios comerciales a Estados Unidos y China (European Union, s. f.).

Finalmente, en 1983 se firma el ANZCERTA entre Australia y Nueva Zelanda. Su objetivo es fortalecer la relación económica entre ambos a través de la eliminación de barreras comerciales y fomentando una competitividad leal. Actualmente, se encuentra impulsando la ciencia e innovación en la región junto a políticas que mejoren el comercio con empresas miembros. Entre 2019 y 2020 el bloque logró un comercio de 28.5 mil millones de dólares (Australia-New Zealand Closer Economic Relations Trade Agreement, s. f.).

## 5.5. Econofísica

Además de modelar el comercio, se desea pronosticar las exportaciones e importaciones. Durante la investigación tomé interés en la rama de *econofísica*. A pesar de salir del perfil convencional de un físico, las finanzas y economía se han beneficiado de los avances en esta ciencia. La ecuación de gravitación de comercio es un ejemplo. El orden de su evolución se toma del libro *Econophysics and Physical Economics*.

Sus inicios pueden trazarse a Aristóteles. Además de sentar los fundamentos de la lógica y la física, en economía consideró que las sociedades intercambian bienes y servicios a través del trueque. Cuando una de las partes carece de algo que la otra quiere o necesita se generan conflictos. El dinero, con valor intrínseco, es la solución; esta idea se mantiene en la actualidad (Richmond et al., 2013).

Le sigue Nicolas Copérnico, fundador de la teoría heliocéntrica. En 1522 analizó el efecto que la devaluación de una divisa tiene en la inflación; por lo tanto, propuso las primeras reglas para mantener la estabilidad del dinero y regular su emisión. Sobre la última, Newton formó parte de la Real Casa de la Moneda en Londres donde escribió varios reportes del valor del oro y plata para diferentes monedas europeas (Richmond et al., 2013).

El siglo XVII tuvo varias contribuciones. Christiaan Huyne, reconocido por sus aportes en óptica, construye una curva de mortandad que sirvió como base para que las aseguradoras aplicaran la Teoría de Probabilidad de la cual Blaise Pascal (con gran influencia en la mecánica de fluidos) junto a Pierre de Fermat establecieron sus fundamentos (Richmond et al., 2013).

Paralelamente, Edmond Halley, astrónomo descubridor del cometa con su nombre, realizó publicaciones sobre la mortandad y la esperanza de vida de las personas. En 1693 publicó un artículo sobre el precio de las rentas vitalicias en función de la edad, esto sirvió de base para el desarrollo de las ciencias actuariales (Richmond et al., 2013).

Continúa el físico y matemático Louis Bachelier. En 1900 publica *La Teoría de la Especulación* donde utiliza la teoría del paseo aleatorio y el Movimiento Browniano para determinar si el precio de las acciones de la bolsa de valores sube o baja (Richmond et al., 2013).

El primero, también conocido como *random walk*, es una trayectoria compuesta por pasos sucesivos aleatorios donde cada movimiento es independiente del resto. El segundo es la formulación de este comportamiento debido a que hay sistemas que lo experimentan (sistemas estocásticos) como la trayectoria que siguen las moléculas de polen suspendidas en un líquido (Sinha et al., 2010).

Sobre su trabajo, concluye que la variación de los precios es aleatoria que puede modelarse con el movimiento Browniano. Es necesario mencionar que su contribución no se utilizó hasta 50 años después (1950) en la bolsa de valores (Richmond et al., 2013).

Posteriormente, el mercado financiero se estudia como un sistema complejo. El cambio de precios puede deberse a fluctuaciones en la economía global, desastres naturales, tensiones políticas, tarifas, guerras, etc. Debido a esto se implementan conceptos de termodinámica (por Nicolas Carnot) y mecánica estadística (por Ludwig Boltzmann, James Maxwell y Josiah Gibbs) para analizar este y otros fenómenos. Gracias a los avances en computación y la accesibilidad a una gran cantidad de información, ambas teorías se volvieron fundamentales en esta nueva rama (Richmond et al., 2013).

La econofísica se centra en la naturaleza de los activos financieros. Desde el modelado de la fluctuación de precios, hasta el motivo por el cual los mercados colapsan; pasando por el manejo de riesgo financiero y la aplicación de distintos modelos. Si el lector desea profundizar en estos últimos, se recomienda la tesis del físico Jorge Manuel Domínguez Pérez: *Modelos de fluctuaciones de precios de activos* de esta casa de estudio (Domínguez, 2020).

## 5.6. Modelos autorregresivos ARIMA y SARIMA

Entre los patrones de fluctuación se encuentran los modelos autorregresivos. Estos se caracterizan por utilizar valores pasados de una misma variable para predecir su comportamiento. En el caso del precio de las acciones, se usa su serie temporal. Los modelos se pueden clasificar en dos grupos: los que predicen el precio y los que predicen su volatilidad <sup>14</sup> (Sinha et al., 2010).

Esta investigación se centra en el primer grupo: los modelos autorregresivos de media móvil (ARMA). Se introducen en 1938 como una evolución a los métodos de pronosticación, anteriormente las series deterministas se analizaron usando la metodología de Fourier mediante la suma de senos y cosenos. Su principal crítica es que este no es válido para series reales (que recoja la evolución de un sistema físico) porque las amplitudes y periodos de estas funciones trigonométricas son estocásticas que pueden encontrarse con los valores pasados de la serie. Adicionalmente, se encontró que las series tenían tendencias, componentes cíclicos y elementos irregulares (Espasa, 1991).

El modelo autorregresivo AR (p) utiliza una combinación lineal de predictores basados en la evolución de la variable de interés:  $y_t$ . Los predictores son sus valores rezagados ( $y_{t-1}, y_{t-2}, \dots, y_{t-p}$ ); adicionalmente, sus parámetros se representan con la letra griega  $\phi$  ( $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_t$ ). Finalmente,  $\epsilon_t$  es una variable de error y  $c$  una constante (Hyndman & Athanasopoulos, 2021).

$$y_t = c + \phi_1 y_{t-1} + \phi_2 y_{t-2} + \dots + \phi_p y_{t-p} + \epsilon_t \quad (5.17)$$

El modelo de media móvil MA (q) utiliza los errores  $\epsilon_t$  como predictores. Estos no se pueden observar, son intrínsecos de la serie. Sus parámetros son  $\theta$  y también cuenta con una constante (Hyndman & Athanasopoulos, 2021).

$$y_t = c + \epsilon_t + \theta_1 \epsilon_{t-1} + \theta_2 \epsilon_{t-2} + \dots + \theta_q \epsilon_{t-q} \quad (5.18)$$

Para mejorar la presión de los pronósticos, George Box y Gwilym Jenkins introducen una parte integrada; nacen los modelos ARIMA ( $p, d, q$ ) (media móvil integrada autorregresiva). Esta adición consiste en restar los valores anteriores de la serie hasta volverla estacionario. Sobre su representación: “ $p$ ” son el número de valores pasados de la serie que se usan para predecir el presente, “ $d$ ” el número de veces que se diferencia la serie hasta volverla estacionaria y “ $q$ ” el número de errores pasados usados para mejorar la precisión (Hyndman & Athanasopoulos, 2021). <sup>15</sup>

$$y'_t = c + \phi_1 y'_{t-1} + \dots + \phi_p y'_{t-p} + \theta_1 \epsilon_{t-1} + \dots + \theta_q \epsilon_{t-q} + \epsilon_t \quad (5.19)$$

Si la serie de tiempo tiene un patrón estacional se utiliza los modelos SARIMA (Seasonal ARIMA). Este es una extensión del ARIMA, agrega nuevas variables estacionales:  $\Phi$  y  $\Theta$ , al igual que nuevos parámetros: P, D, Q y m. Las mayúsculas cumplen la misma función que las del modelo anterior, mientras que  $m$  es el periodo de estacionalidad (el número de periodos que tarda en repetirse un patrón) (Hyndman & Athanasopoulos, 2021). En conjunto:

$$\text{ARIMA}(p, d, q) (P, D, Q) m \quad (5.20)$$

Equivalente a:

$$(1 - \phi_p B^p) (1 - \Phi_p B^{Pm}) (1 - B)^d (1 - B^m)^D y_t = c + (1 + \theta_q B^q) (1 + \Theta_Q B^{Qm}) \epsilon_t \quad (5.21)$$

<sup>14</sup>Véanse los modelos ARCH y GARCH.

<sup>15</sup>Es necesario mencionar que el ARIMA (0, 1, 0) es equivalente al *random walk* (Hyndman & Athanasopoulos, 2021).

$$(1 - \phi_1 B - \dots - \phi_p B^p) (1 - \Phi_1 B^m - \dots - \Phi_p B^{Pm}) (1 - B)^d (1 - B^m)^D y_t = c + (1 + \theta_1 B + \dots + \theta_q B^q) (1 + \Theta_1 B^m + \dots + \Theta_Q B^{Qm}) \epsilon_t \quad (5.22)$$

Donde  $B$  es una notación de retroceso, *backshift notation*, que simplifica la representación (Hyndman & Athanasopoulos, 2021):

$$B_{y_t}^n = y_{t-n} \quad (5.23)$$

Bajo esta interpretación los modelos ARIMA (p, d, q) se expresan como:

$$(1 - \phi_p B^p) (1 - B)^d y_t = c + (1 + \theta_q B^q) \epsilon_t \quad (5.24)$$

$$(1 - \phi_1 B - \dots - \phi_p B^p) (1 - B)^d y_t = c + (1 + \theta_1 B + \dots + \theta_q B^q) \epsilon_t \quad (5.25)$$

## 5.7. La Economía de Japón de la segunda postguerra

Ambos modelos autorregresivos se desean aplicar al comercio bilateral entre Japón y Guatemala como un estudio de caso. Durante la investigación tomé interés en el desarrollo económico de postguerra del país Nipón, fue sorprendente investigar cómo Japón se levantó de los escombros causados por la peor aplicación de la física nuclear <sup>16</sup> a volverse una potencia tecnológica y económica mundial a pesar de los altibajos que experimentó y sigue experimentando.

Su desarrollo puede dividirse en cinco períodos: la ocupación de las fuerzas aliadas (1945 - 1952), el boom económico de postguerra (1953-1971), la burbuja económica (1972- 1991), las décadas perdidas (1992 - 2011) y el periodo post pandemia y de nuevos ideales capitalistas (2012 -) (Bytheway, 2022).

El primero comienza tras la rendición de Japón el 2 de septiembre de 1945. La Ocupación Aliada se encargó de desmilitarizar, democratizar, descentralizar y desconcentrar el país. El primero redujo la fuerza del ejército y marina imperial japonés, el segundo estableció una democracia con una economía descentralizada (donde se transfiere parte del poder del gobierno a niveles regionales) y desconcentrada (donde se dispersa el control económico de las principales familias empresariales [conocidas como zaibatsu] hacia la Ocupación). En conjunto lograron una reforma agraria, reforma fiscal y leyes sobre la distribución de tierras y protección de los trabajadores (Bytheway, 2022).

A pesar de esto, no se logran mitigar los efectos de la inflación. Momentáneamente se instauró una economía de austeridad donde se redujo el gasto público. Esto causó una recesión, desempleo masivo, un retroceso en la recuperación de Japón y una animadversión hacia la Ocupación. Todo cambió con el inicio de la Guerra de Corea en 1950, Estados Unidos se abasteció de bienes y servicios japoneses. Adicionalmente el país Nipón se volvió un aliado importante para combatir el Comunismo en Asia durante la Guerra Fría (Bytheway, 2022).

La guerra fue promotora de la recuperación. El periodo de 1954 a 1957 se conoce como el boom de Jimmu y el de 1957 a 1961 como el boom de Iwato; ambos representan prosperidad. Numéricamente, el crecimiento anual promedio del PIB japonés entre 1956 y 1960 fue de 8.8% mientras que el estadounidense y el británico fue de 2%. Esto dio paso a una rápida transformación socioeconómica (Bytheway, 2022).

<sup>16</sup>Véanse las fotografías de Yoshito Matsushige; se recomienda discreción.

Se planteó duplicar los ingresos. Durante los sesenta hubo una gran inversión gubernamental en la industria, incentivos para aumentar las exportaciones, excepciones fiscales y mejoras al sistema sanitario. En conjunto promovieron un rápido crecimiento económico. Sobre su industria, se priorizó la innovación; por lo tanto, las mayorías de sus exportaciones pasaron a ser productos electrónicos. El crecimiento del PIB promedio entre 1961 y 1965 fue de 9.2%. En 7 años se logró duplicar los salarios (Bytheway, 2022).

La economía japonesa era imparable. Entre 1966 y 1970 el aumento de su PIB fue de 11.1% mientras que el británico fue de 2% y el estadounidense de 3%. Este último experimentó un resentimiento hacia Japón por sus prácticas comerciales proteccionistas. En síntesis, el país Nipón tenía un superávit de exportaciones mientras restringía las importaciones y la entrada de empresas extranjeras. Por lo tanto, la administración del presidente Richard Nixon solicitó una revisión a las políticas de liberación de Japón. Esto resultó en la entrada de las primeras empresas estadounidense; sin embargo, no fue el único cambio hecho por el presidente (Bytheway, 2022).

El Nixon Shock fue determinante. Previamente el precio del dólar estuvo respaldado por el oro. Sin embargo, la guerra de Vietnam junto a los programas de ayuda internacionales causó que Estados Unidos tuviera en circulación más dinero que sus reservas del mineral por lo que se temía una devaluación del dólar (Milestones In The History Of U.S. Foreign Relations - Office Of The Historian, s.f.). Como solución, el 15 de agosto de 1971 se rompe este respaldo con la política conocida como el Nixon Shock; este cambió el sistema financiero internacional. Entre sus efectos estuvo la devaluación del yen, el cambio de 350 ¥ por 1\$ pasó a ser de 265 ¥ o 300 ¥ por 1\$. Esto afecta al país, mayormente industrial, porque se encarecen sus exportaciones en un mercado competitivo (Bytheway, 2022).

Hubo un freno al crecimiento económico de Japón. Sumando al shock, entre 1973 y 1974 ocurrió la primera crisis del petróleo debido a conflictos políticos en medio oriente que cuadruplicaron su precio. A pesar de esto, la economía se mantuvo estable. El crecimiento promedio del PIB entre 1971 y 1975 fue de 4.5% y entre 1976 y 1980 fue de 4.4% (Bytheway, 2022).

La década de los ochenta fue de transición. Comienza rezagada por los cambios mencionados, entre 1981 y 1985 el crecimiento del PIB fue de 3.3%. A pesar de esto, la industria nipona continuó innovando en el sector automotriz y electrónico (especialmente con semiconductores). Fue en esta época donde sus productos se volvieron reconocidos mundialmente y ganaron la reputación de ser altamente confiables. Por lo tanto, comenzaron a dominar el mercado mundial. Paralelamente, en occidente, el dólar se fortaleció haciendo que se encarezcan las exportaciones estadounidenses. Esto causó presiones políticas internas en EE. UU. debido a su nuevo déficit comercial con Japón y otros países (Bytheway, 2022).

El 22 de septiembre de 1985 toma lugar el Acuerdo de la Plaza. Alemania, Francia, Japón y el Reino Unido, miembros del G5, aceptaron apreciar sus monedas para devaluar el dólar; esto permitiría a Estados Unidos aumentar sus exportaciones al bajar sus precios. Adicionalmente, EE. UU. aprovechó el acuerdo para reducir la capacidad exportadora de Japón, en tres años se había triplicado el superávit de Japón con EE. UU. siendo de 31 mil millones de dólares en 1983 a 93 mil millones de dólares en 1986. Para finales de 1987 la tasa de cambio fue de 130¥ por 1\$ (Bytheway, 2022).

La apreciación del yen y las bajas tasas de interés fueron catalizadores para la economía de burbuja. El acuerdo de la plaza redujo las exportaciones japonesas; por ende, también las ganancias de las empresas, esto pudo causar una recesión. Para evitarlo, el Banco de Japón redujo su tasa de interés de 5% a 2.5% para estimular la economía. Empresas e individuos toman préstamos para la compra de acciones y bienes raíces (nacionales e internacionales); esto infló los precios de ambos (Bytheway, 2022).

Por lo tanto, si deseaban obtener nuevos préstamos podían usar estas acciones y bienes como garantías. Debido a su nueva apreciación, era posible obtener aún más crédito para repetir este

proceso; esto impulsó las compras especulativas y un estilo de vida ostentoso. A ojos internacionales el país era imparable, en un punto el mercado inmobiliario japonés estuvo valorado en dos mil billones de yenes mientras que el estadounidense en quinientos billones de yenes; una cuarta parte del asiático (Bytheway, 2022).

Esto era insostenible y peligroso. Para controlarlo el Banco de Japón decidió subir las tasas de interés, a partir de 1989 el precio de las acciones y bienes raíces comenzaron a caer. Al principio los bancos creyeron que sería temporal, pero siguieron bajando. Los préstamos hechos en la burbuja se volvieron impagables y los bancos, que tenían estos bienes como garantía, comenzaron a reportar grandes pérdidas. Esto causó desconfianza en ellos a nivel nacional e internacional. Entre sus medidas de contención hicieron restricciones crediticias, esto afectó a la capacidad de inversión y contratación de las empresas japonesas que en ese momento ya se encontraban endeudadas (Bytheway, 2022).

La burbuja estalló. Bancos y empresas se declararon en bancarrota causando un desempleo masivo y la intervención internacional (Bytheway, 2022). Como comparativa, el crecimiento promedio del PIB entre 1981 a 1985 (antes del Nixon Shock) fue de 4.15 %, entre 1986 a 1991 (durante la burbuja económica) fue de 4.65 % con su máximo en 1988 de 6.66 % y entre 1992 a 1999 (durante la primera década pérdida) fue de 0.83 % con su mínimo en 1998 de -1.27 % (World Bank Open Data, s. f.).

El nuevo milenio siguió viviendo los efectos. El crecimiento del PIB entre 2001 y 2005 fue de 1.2 %, entre 2006 y 2010 de 0.15 %. A este difícil contexto se sumó la tragedia del viernes 11 de marzo de 2011 cuando un fuerte terremoto seguido por un desastroso tsunami impactó al noreste del país cobrando miles de vidas y afectando a millones más (National Centers for Environmental Information (NCEI), 2025). Además del incalculable costo humano y emocional, el desastre causó una crisis energética (debido a daños en la infraestructura de la central nuclear Fukushima Dai-ichi) y económica que se reflejó en un PIB de 0.02 %. Entre 2011 y 2015 el crecimiento fue de 1 %, entre 2016 y 2020 de 1.1 % y entre 2021 y 2023 de 1.73 % (World Bank Open Data, s. f.).

Actualmente, sus nuevas políticas se centran en la innovación y equidad. Concretamente: invertir en la población, innovación digital, innovación verde y seguridad económica. El primero busca equidad y mejoras en las condiciones laborales junto al empoderamiento de las mujeres; el segundo una revolución informática a través de nuevos microprocesadores, avances en ciberseguridad e inteligencia artificial; el tercero un desarrollo sostenible centrado en reducir los efectos del calentamiento global; el último reducir su dependencia industrial de países extranjeros (Bytheway, 2022).

## 5.8. Estudio II: pronóstico de exportaciones e importaciones entre Japón y Guatemala

El objetivo de este estudio es pronosticar las exportaciones e importaciones de los principales productos de la industria agropecuaria, manufacturera y de extracción entre Japón y Guatemala a través de los modelos ARIMA y SARIMA. Los pronósticos se harán a corto, mediano y largo plazo: 1,5 y 10 años; respectivamente.

De esta forma se comprenderá, a grandes rasgos, nuestra relación comercial con Japón y la futura demanda de bienes. En caso de que este estudio tenga un alcance mayor que el de obtener un título de pregrado, los resultados pueden ser útiles para: inversores, empresas exportadoras y entidades públicas.

Una exploración preliminar de las exportaciones mensuales de café muestra estacionalidad (Figura 5.4), es tentativo el uso de SARIMA para pronosticar y explicarlo.

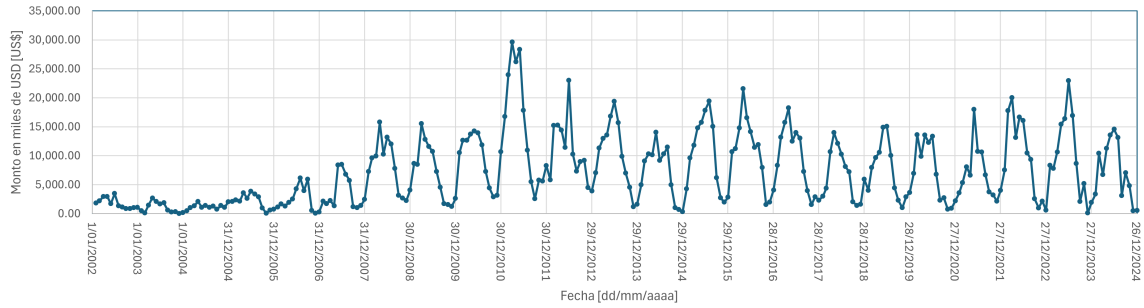


Figura 5.12. Exportación mensual de café hacia Japón (elaboración propia)

Una inspección de las importaciones mensuales de vehículos y material de transporte no muestran un patrón definido (Figura 5.5). Es recomendable usar ARIMA como primera pronóstico. La metodología de este y el anterior estudio se detallan a continuación.

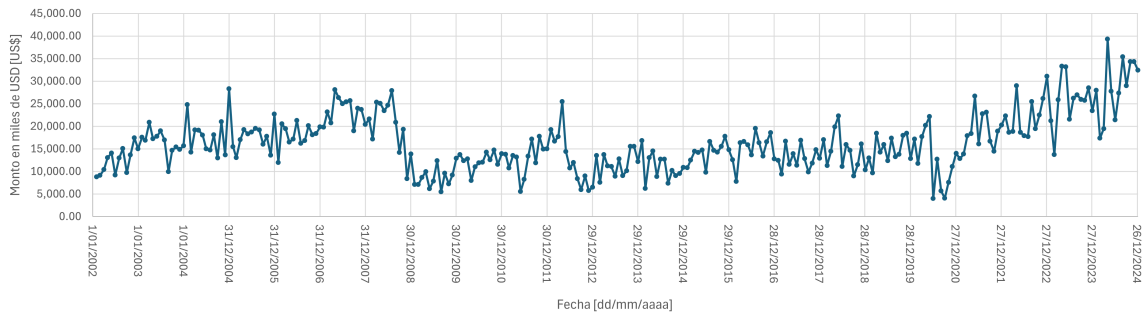


Figura 5.13. Importación mensual de vehículos y material de transporte desde Japón (elaboración propia)

## 6.1. Estudio I: comercio internacional de Guatemala a través del modelo de gravitación

### 6.1.1. Ecuación ingenua

Se utilizarán dos definiciones de la ecuación gravitacional de comercio: la ingenua y la estructural. La primera (ecuación 5.16) se conforma de cuatro tipos de variables: macroeconómicas, de gobernanza, socioculturales y geográficas. A excepción de ambos PIB, el resto se engloba en la información de accesibilidad de comercio:  $\phi_{ni}$ .

$$X_{ni} = GY_i^a Y_n^b \phi_{ni}$$

A continuación se presentan las 19 variables ortogonales tras una prueba de factor de inflación de varianza (VIF):

Cuadro 6.1. Variables macroeconómicas

Variable	Descripción	Fuente
<b>Exp o Imp</b>	Exportaciones o importaciones anuales entre Guatemala y el país importador (cuantitativa: USD\$, nominal).	Banco de Guatemala
<b>PIB<sub>Importador</sub></b>	PIB nominal del país importador (cuantitativa: USD\$, nominal).	Banco Mundial
<b>PIB<sub>Exportador</sub></b>	PIB nominal de Guatemala (cuantitativa: USD\$, nominal).	Banco Mundial
<b>Pob<sub>Importador</sub></b>	Población del país importador (cuantitativa: número absoluto de habitantes).	Banco Mundial

*Continúa en la siguiente página*

Cuadro 6.1 (continuación).

Variable	Descripción	Fuente
<b>Bloques</b>	Engloba los bloques comerciales COMESA, TLCAN, MERCOSUR, ASEAN +3, UE y ANZCERTA. Durante la segunda etapa del análisis, esta variable será sustituida por el nombre de cada uno (binaria: pertenencia a cada bloque).	Varios (véase el marco teórico)

Cuadro 6.2. Variables de gobernanza

Variable	Descripción	Fuente
<b>PV</b> Importador	<i>Estabilidad política y ausencia de violencia/terrorismo</i> : mide la probabilidad de inestabilidad y violencia política en el país importador (cuantitativa).	Grupo del Banco Mundial
<b>va</b> Importador	<i>Voz y rendición de cuentas</i> : engloba la participación ciudadana, libertad de expresión, libertad de asociación y libertad de prensa del país importador (cuantitativa).	Grupo del Banco Mundial
<b>CC</b> Exportador	<i>Control de la corrupción</i> : percepción del uso del poder público en beneficio personal e influencia de grupos privados en las decisiones del gobierno de Guatemala (cuantitativa).	Grupo del Banco Mundial
<b>ge</b> Exportador	<i>Eficiencia del gobierno</i> : percepción de la calidad de servicios públicos, políticas públicas y ministerios de Guatemala (cuantitativa).	Grupo del Banco Mundial
<b>rl</b> Exportador	<i>Estado de derecho</i> : percepción del respeto y cumplimiento de las leyes junto a la efectividad de la policía y el sistema judicial de Guatemala (cuantitativa).	Grupo del Banco Mundial
<b>rq</b> Exportador	<i>Calidad regulatoria</i> : percepción de la capacidad del gobierno para implementar políticas y regulaciones que favorezcan el desarrollo del sector privado en Guatemala (cuantitativa).	Grupo del Banco Mundial
<b>va</b> Exportador	<i>Voz y rendición de cuentas</i> : engloba la participación ciudadana, libertad de expresión, libertad de asociación y libertad de prensa de Guatemala (cuantitativa).	Grupo del Banco Mundial

Cuadro 6.3. Variables socioculturales

Variable	Descripción	Fuente
<b>Idioma<sub>español</sub></b>	Especifica si el país importador habla español (binaria).	Centro de Estudios Prospectivos e Información Internacional (CEPII)
<b>MismoColonizador</b>	Específica si el país importador tuvo el mismo colonizador que Guatemala: España (binaria).	CEPII
<b>Colonizador</b>	Identifica si el país importador es España (binaria).	CEPII

Cuadro 6.4. Variables geográficas

Variable	Descripción	Fuente
<b>Área<sub>Importador</sub></b>	Área territorial del país importador (cuantitativa: $km^2$ ).	CEPII
<b>AccesoMar</b>	Acceso al mar del país importador y de Guatemala (binaria).	CEPII
<b>MismaFrontera</b>	País importador que comparte frontera con Guatemala (binaria).	MapChart
<b>Distancia</b>	Distancia entre Guatemala y el país importador (cuantitativa: $km$ ).	CEPII

La distancia es una aproximación de los costos de transporte (Tinbergen, 1962). Si bien lo ideal habría sido contar con datos sobre la distancia marítima o aérea recorrida por los productos, esta no se pudo recolectar para los 200 países, estados e islas. Por esto, se calculó la distancia geodésica de la Tierra. A pesar de ser un esferoide, su diferencia con una esfera perfecta es de 0.5% (Earle, 2006); por lo tanto, se calculó la geodésica de una esfera (Anexo A) que corresponde a un círculo máximo que tiene la siguiente distancia (Anexo B):

$$D = \rho \arccos(\sin \phi_A \cdot \sin \phi_B + \cos \phi_A \cdot \cos \phi_B \cdot \cos(\theta_A - \theta_B)) \quad (6.1)$$

Aquí,  $\rho$  corresponde al radio promedio de la Tierra (6,378 km),  $\phi_A$  la latitud del país exportador,  $\phi_B$  la latitud del país importador,  $\theta_A$  la longitud del país exportador y  $\theta_B$  la longitud del país importador <sup>1</sup>. Sustituyendo:

$$\text{Distancia} = 6378 \arccos(\sin \phi_{\text{GTM}} \cdot \sin \phi_j + \cos \phi_{\text{GTM}} \cdot \cos \phi_j \cdot \cos(\theta_{\text{GTM}} - \theta_j)) \quad (6.2)$$

Siguiendo la metodología de Tinbergen, la fórmula general de la ecuación ingenua usada en este estudio es:

<sup>1</sup>Es necesario notar que las medidas de latitud y longitud deben transformarse a radianes.

Exp o Imp =  $\alpha_0 \cdot$

$$\begin{aligned} & \log \text{PIB}_{\text{Importador}}^{\beta_1} \cdot \log \text{PIB}_{\text{Exportador}}^{\beta_2} \cdot \log \text{Pob}_{\text{Importador}}^{\beta_3} \cdot \text{Bloques}^{\alpha_4} \cdot \\ & \text{PV}_{\text{Importador}}^{\beta_5} \cdot \text{va}_{\text{Importador}}^{\beta_6} \cdot \text{cc}_{\text{Exportador}}^{\beta_7} \cdot \text{gC}_{\text{Exportador}}^{\beta_8} \cdot \text{r1}_{\text{Exportador}}^{\beta_9} \cdot \\ & \text{rg}_{\text{Exportador}}^{\beta_{10}} \cdot \text{va}_{\text{Exportador}}^{\beta_{11}} \cdot \text{Idioma}_{\text{Español}}^{\beta_{12}} \cdot \text{MismoColonizador}^{\beta_{13}} \cdot \text{Colonizador}^{\beta_{14}} \cdot \\ & \text{Área}_{\text{Importador}}^{\beta_{15}} \cdot \text{AccesoMar}^{\beta_{16}} \cdot \text{MismaFrontera}^{\beta_{17}} \cdot \log \text{Distancia}^{\beta_{18}} \cdot \epsilon_{\text{GTM},j} \end{aligned} \quad (6.3)$$

### 6.1.2. Ecuación estructural: gravity by gravitas

Este es el estándar para las investigaciones económicas debido a su consistencia y su capacidad de identificar el efecto de políticas comerciales. Adicionalmente, este modelo reduce los sesgos y logra resultados más significativos al utilizar resistencias multilaterales para los países importadores y exportadores. Nuevamente, su forma: <sup>2</sup>

$$X_{ij}^k = \frac{Y_i^k E_j^k}{Y^k} \left( \frac{\tau_{ij}^k}{\Pi_i^k P_j^k} \right)^{1-\sigma_k} \quad (6.4)$$

Donde:

$$\tau_{ij}^k = \text{Distancia}^{\beta_0} + e^{\text{MismaFrontera}^{\beta_1}} + e^{\text{Idioma}_{\text{Español}}^{\beta_2}} + e^{\text{MismoColonizador}^{\beta_3}} \quad (6.5)$$

Sobre sus variables:

Cuadro 6.5. Variables del modelo estructural *gravity by gravitas*

Variable	Descripción
$X_{ij}^k$	Las exportaciones indexadas entre los países “i” y “j” en el sector económico “k”.
$Y_i^k$	PIB del país “i”.
$E_j^k$	Gasto del país importador, a nivel sectorial este puede ser diferente al PIB.
$Y^k$	PIB mundial.
$\tau_{ij}$	Función de costo comercial, incluye las variables que influyen en los precios.
$\Pi_i^k$	Resistencia multilateral externa, especifica que las exportaciones dependen de los costos comerciales de todos los mercados de exportación posibles.
$P_j^k$	Resistencia multilateral interna, es la dependencia de las importaciones con los costos comerciales entre todos los posibles proveedores.
$\sigma^k$	Elasticidad de sustitución entre bienes, causa sensibilidad en los precios.

<sup>2</sup>Su deducción paso a paso puede obtenerse de *The Gravity Model of International Trade: a user guide* (Shepherd, Doytchinova & Kravchenko, 2019)

Generalmente las resistencias multilaterales son inobservables debido a la accesibilidad de información; por lo tanto, se utilizan aproximaciones. Al trabajarse un modelo que no diferencia sectores económicos, la ecuación 6.4 se transforma (Shepherd, Doytchinova & Kravchenko, 2019):

$$\begin{aligned} X_{ij}^k &= \frac{Y_i^k E_j^k}{Y^k} \left( \frac{\tau_{ij}^k}{\Pi_i^k P_j^k} \right)^{1-\sigma_k} \\ X_{ij} &= \frac{1}{Y} \frac{Y_i}{\Pi_i^{(1-\sigma)}} \frac{E_j}{P_i^{(1-\sigma)}} \tau_{ij}^{(1-\sigma)} \\ X_{ij} &= \frac{1}{Y} \cdot F_{GTM} \cdot F_{imp} \cdot \tau_{ij}^{(1-\sigma)} \end{aligned} \quad (6.6)$$

Aquí  $F_{GTM}$  son los efectos fijos de Guatemala y  $F_{imp}$  los del país importador. Estos son útiles para las diferentes técnicas de estimación que se discuten a continuación (Shepherd, Doytchinova & Kravchenko, 2019).

### 6.1.3. Métodos de estimación

La literatura recomienda tres: el estimador de pseudo máxima verosimilitud de Poisson (PPML), análisis de panel de efectos fijos y el modelo de selección de muestra de Heckman. En conjunto incluye observaciones donde el comercio total es cero; esto evita sesgos de selección de muestra (Shepherd, Doytchinova & Kravchenko, 2019) <sup>3</sup>. Sus detalles se muestran a continuación:

#### Pseudo máxima verosimilitud de Poisson (PPML)

Su objetivo es encontrar la media condicional del comercio. Esto es, el comercio promedio entre Guatemala y el país “j” dadas las variables explicativas (Cuadros 6.1 a 6.4). Es necesario mencionar que se estima el promedio porque las relaciones económicas no tienen la precisión de las relaciones físicas (Silva & Tenreiro, 2006).

Sobre su funcionamiento, comienza reescribiendo la ecuación en forma exponencial. Aquí  $V$  es el vector de variables y  $\beta$  el de coeficientes, su producto punto hace la combinación lineal <sup>4</sup>.

$$\mathbb{E}[X_i | V_i] = \exp(V_i \cdot \beta) \quad (6.7)$$

Posteriormente utiliza una variante de la forma funcional de la verosimilitud del modelo de Poisson. Tras maximizarla, genera la siguiente expresión donde los residuos son ortogonales a las variables explicativas. Es aquí donde se puede resolver para los coeficientes (Silva & Tenreiro, 2006)

$$\sum_{i=0}^n [X_i - \exp(V_i \cdot \beta)] V_i = 0 \quad (6.8)$$

<sup>3</sup>Esto ocurre durante las estimaciones en escala logarítmica como las de Tinbergen y Aitken. Concretamente en la variable de comercio:  $\log X_{ij}$ . En años donde el comercio es cero, el logaritmo se indefine; por lo tanto, es necesario omitir esta observación.

<sup>4</sup>Importante, el subíndice de sumatoria “i” corresponde a una observación completa (GTM, j) en vez del país importador.

**Análisis de panel de efectos fijos (P. EF)**

Es útil para capturar el impacto que tienen las variables explicativas no observadas (las resistencias multilaterales) sobre la variable de interés.<sup>5</sup> Se caracteriza por tener un registro temporal consecutivo de los datos y estar organizado por niveles (Schmidheiny, 2024). Su fórmula general es:

$$y_{it} = \alpha + x'_{it} \cdot \beta + z'_i \cdot \gamma + c_i + u_{it} \quad (6.9)$$

Aquí  $y_{it}$  es la variable dependiente,  $x_{it}$  las variables que varían con el tiempo,  $z_i$  las variables que no cambian,  $\beta$  y  $\gamma$  los coeficientes,  $c_i$  los efectos fijos, y  $u_{it}$  el término de error (Schmidheiny, 2024).

El objetivo es eliminar los efectos fijos. Para esto resta el promedio temporal de cada variable a la original (representados por diéresis). Así, elimina las variables que son constantes en el tiempo lo que permite estimar los coeficientes inclusive habiendo correlación con  $c_i$  (Schmidheiny, 2024).

$$\ddot{y}_{it} = \ddot{x}'_{it} \cdot \beta + \ddot{u}_{it} \quad (6.10)$$

Donde:

$$\ddot{y}_{it} = y_{it} - \bar{y}_i ; \ddot{x}_{it} = x_{it} - \bar{x}_i \quad (6.11)$$

**Modelo de selección de muestra de Heckman**

En dos etapas logra la estimación. Comienza con un modelo de selección que describe el incentivo de que el país “i” comercie con el “j”. Para esto, incluye una variable adicional que afecte este valor. En el ejemplo utiliza el costo de entrada al mercado: *entry* (Shepherd, Doytchinova & Kravchenko, 2019).

$$p_{ij}^k = \log Y_i^k + \log E_j^k - \log Y^k + (1 - \sigma_k) [\log \tau_{ij}^k - \log \Pi_i^k - \log P_j^k] + b \log entry_{ij} + w_{ij}^k \quad (6.12)$$

Posteriormente transforma el incentivo en una decisión binaria (Shepherd, Doytchinova & Kravchenko, 2019).

$$d_{ij}^k = \begin{cases} 1 & \text{si } p_{ij}^k > 0 \\ 0 & \text{si } p_{ij}^k \leq 0 \end{cases} \quad (6.13)$$

Con esto realiza una regresión de *probit* para predecir la probabilidad de que ocurra el comercio (Shepherd, Doytchinova & Kravchenko, 2019).

$$Prob(d_{ij}^k = 1) = \Phi(\log Y_i^k + \log E_j^k - \log Y^k + (1 - \sigma_k) [\log \tau_{ij}^k - \log \Pi_i^k - \log P_j^k] + b \log entry_{ij}) \quad (6.14)$$

Con el resultado, calcula el inverso del índice de Mills que sirve para corregir el sesgo de selección de muestra (Shepherd, Doytchinova & Kravchenko, 2019).

$$\lambda_{ij}^k = \frac{\phi(Z_{ij}^k \gamma)}{\Phi(Z_{ij}^k \gamma)} \quad (6.15)$$

Finalmente estima la ecuación de comercio, implementando el índice, solo para los países que sí comercian (Shepherd, Doytchinova & Kravchenko, 2019).

$$\log X_{ij}^k = \log Y_i^k + \log E_j^k - \log Y^k + (1 - \sigma_k) [\log \tau_{ij}^k - \log \Pi_i^k - \log P_j^k] + \rho \lambda_{ij}^k + \varepsilon_{ij}^k \quad (6.16)$$

<sup>5</sup>Generalmente las variables explicativas no observadas están correlacionadas con otras variables observadas (Schmidheiny, 2024)

### 6.1.4. Pruebas de especificación

Las pruebas verifican que los modelos estén bien planteados. Cada método de estimación tiene una diferentes, para PPML se utiliza la prueba de enlace de Pregibon y para el análisis de panel de efectos fijos y el modelo de Heckman, la prueba RESET de Ramsey. Brevemente:

#### Prueba de enlace de Pregibon

La prueba de enlace de Pregibon verifica que la media del modelo PPML esté bien especificada bajo el enlace log (Pregibon, 1980). Esto significa que toma el logaritmo del modelo PPML:

$$Y_0 = \log X_{ij} = \log \exp\{(V_i \cdot \beta)\} = V_i \cdot \beta \quad (6.17)$$

En base a este, crea un modelo auxiliar con predictores lineales:

$$Y_1 = V_i \cdot \beta + \hat{p} + \hat{p}^2 \quad (6.18)$$

Después, estima y compara la media condicional de ambos modelos para validar la siguiente hipótesis:

$H_0$  : El modelo  $Y_0$  está bien definido.

$H_1$  : El modelo  $Y_0$  está mal definido.

Si se rechaza  $H_0$  (p - value < 0.05) hay evidencia de una mala forma funcional que arregla  $Y_1$ ; por lo que el modelo PPML original no debe usarse para inferencias.

#### Prueba de error de especificación de regresión (RESET) de Ramsey

Similar al anterior, RESET de Ramsey mide la especificación del análisis de panel de efectos fijos y el modelo de Heckman. Para verificarlo toma el modelo de análisis de panel original:

$$y_{it} = \alpha + x'_{it} \cdot \beta + z'_i \cdot \gamma + c_i + u_{it} \quad (6.19)$$

Tras estimarlo, ajusta los resultados de  $y_{it}$  usando la varianza de los coeficientes para crear el predictor lineal  $\hat{y}$ . Con este se crea un modelo aumentando:

$$y_{it} = \alpha + x'_{it} \cdot \beta + z'_i \cdot \gamma + \hat{y} \cdot \lambda_1 + \hat{y}^2 \cdot \lambda_2 + c_i + u_{it} \quad (6.20)$$

Posteriormente, estima el nuevo modelo para validar las siguientes hipótesis (Ramsey, 1969):

$H_0$  : El modelo tiene distribución normal y los coeficientes tienen media de 0.

$H_1$  : El Modelo tiene distribución normal y los coeficientes tienen una media diferente a 0.

Al rechazar la hipótesis nula (p - value < 0.05), los predictores lineales contribuyen en la estimación; por lo tanto, el análisis de panel puede contar con omisión de variables y no debe usarse para inferencias. Un procedimiento similar ocurre para el modelo de Heckman.

### 6.1.5. Interpretación de resultados

Los coeficientes son elasticidades o semielasticidades. Ambos cuantifican el cambio porcentual o puntual que tienen las exportaciones e importaciones en función de las variables macroeconómicas, de gobernanza, socioculturales y geográficas. En los modelos de gravitación es habitual que ambos PIB y las distancias sean elasticidades, mientras que el resto de las variables se cataloguen como semielasticidades. A continuación, se muestra un ejemplo de cómo interpretarlos.

Se estiman las exportaciones de Guatemala hacia el país “j” durante el periodo de 2002 a 2023 usando el método PPML. Tras comprobar multicolinealidad, robustez, significancia y una buena forma funcional se encuentra:

$$\text{Exp}_{\text{GTM},j} = \exp(0.5 \cdot \log \text{PIB}_{\text{GTM}} + 0.7 \log \text{PIB}_j + 1.5 \cdot ge_{\text{GTM}} - 0.7 \cdot \text{Idioma}_{\text{español}} - 1.2 \log \text{Dist}) \quad (6.21)$$

Comenzando con las elasticidades, es común tomar el logaritmo para facilitar su interpretación (Shepherd, Doytchinova & Kravchenko, 2019). Para el PIB de Guatemala: “*un incremento de 1 % en el tamaño económico guatemalteco se asoció con un aumento de 0.5 % sobre las exportaciones de Guatemala hacia el país ‘j’.*”, para el PIB del país ‘j’: “*un incremento de 1 % en el tamaño del mercado de ‘j’ aumentó las exportaciones guatemaltecas en 0.7 %.*” y para la distancia entre ambos: “*un aumento de 1 % en los costos de transporte redujo en 1.2 % las exportaciones desde Guatemala hasta ‘j’.*”

Continuando con las semielasticidades, estas necesitan otra interpretación. De primero deben transformarse sus coeficientes usando:

$$\Delta \% = (e^{\text{factor} \cdot \alpha} - 1) \cdot 100 \quad (6.22)$$

Aquí *factor* especifica el incremento de las variables ficticias. En vez de ser de 1 % como el del PIB, es de 0.1 puntos para las variables de gobernanza y de 1 punto para las socioculturales y geográficas (variables binarias). El incremento de las de gobernanza es arbitrario para facilitar el análisis, la escala del Grupo del Banco Mundial para estas variables es de  $[-2.5000000, 2.5000000]$ <sup>6</sup> por lo que un avance en la decena se considera adecuado. Por ejemplo, de -1.87654321 en 2022 a -1.77654321 en 2023. Volviendo a la interpretación de la *eficiencia gubernamental* de Guatemala:

$$ge_{\text{GTM}} \Delta \% = (e^{0.1 \cdot 1.5} - 1) \cdot 100 = 16.18 \% \quad (6.23)$$

“*Un avance de 0.1 puntos en la eficiencia gubernamental de Guatemala aumentó las exportaciones guatemaltecas hacia el país ‘j’ en 16.18 %.*” Sobre las variables binarias, estas tienen un aumento puntual por lo que: “*compartir idioma español con el país ‘j’ disminuyó las exportaciones guatemaltecas hacia ‘j’ en 50.34 %.*”

$$\text{Idioma}_{\text{español}} \Delta \% = (e^{1 \cdot -0.7} - 1) \cdot 100 = -50.34 \% \quad (6.24)$$

Es imperativo mencionar que todas las interpretaciones se hacen manteniendo el resto de las variables constantes, *ceteris paribus*. Por último, el intercepto engloba cualquier variables omitidas durante la investigación que pueda influir en el comercio como: tarifas comerciales, guerras, pandemias, etc.

<sup>6</sup>El límite inferior indica mala gobernanza mientras que el superior una buena gobernanza.

## 6.2. Estudio II: pronóstico de las exportaciones e importaciones entre Japón y Guatemala

La información relacionada a las exportaciones e importaciones mensuales entre Japón y Guatemala en el periodo de 2002 a 2024 se recuperó de los reportes de comercio exterior del Banco de Guatemala. Debido al acceso de información, 2002 es el primer año donde se tiene un registro individual del comercio de cada producto <sup>7</sup> (Comercio Exterior de Guatemala, s. f.). Estos pueden dividirse en tres tipos de industrias:

### 6.2.1. Tipos de industrias

#### Industria agropecuaria

Arroz; bulbos, raíces y plantas ornamentales; café; cardamomo; caucho natural; flores y follaje; frutas frescas, secas o congeladas; legumbres y hortalizas; otros productos del reino animal y vegetal; pimienta; semilla de ajonjolí; y tabaco en rama o sin elaborar.

#### Industria manufacturera

Abonos y fertilizantes; alimentos preparados para animales; aparatos electromecánicos de uso doméstico; aparatos de registro y reproducción de sonido; aparatos transmisores y receptores; artículos de vestuario; azúcar; azúcares y artículos de confitería; baterías eléctricas; bebidas, líquidos alcohólicos y vinagres; café solubles y molido; calzado; clavos y tornillos; detergentes y jabones; discos, matrices y cintas (de grabación); grasas y aceites comestibles; harinas de cereales; herramientas, artículos de cuchillería; hilos e hilazas; insecticidas, fungicidas y desinfectantes; instrumentos médicos y otros.

Continúan: joyería de fantasía; juguetes, juegos y artículos de recreo y deportes; láminas y alambre; leche y otros productos lácteos; manufacturas de caucho; manufacturas de cerámica; manufacturas de cuero; manufacturas de madera; manufacturas de papel y cartón; manufactura de piedras y metales preciosos y semi preciosos; manufacturas diversas; máquinas y aparatos mecánicos para usos electrotécnicos; materiales plásticos y sus manufacturas; materiales textiles (tejidos y telas); muebles para el hogar, oficina, médico quirúrgico, etc.

Por último: neumáticos y tubos; objetos de arte, para colecciones y antigüedades; otras manufacturas de metales comunes; otros aceites esenciales; papel y cartón; pescados y moluscos; pinturas y barnices; preparados a base de cereales; preparados de carne, pescados, crustáceos y moluscos; preparados de legumbres y hortalizas; preparados de frutas; productos de perfumería, tocador y cosméticos; productos diversos de la industria química; productos farmacéuticos; productos fotográficos y cinematográficos; ropa de cama, de mesa, tocador, cocina y baño; salsas, condimentos y sazónadores compuestos; sombreros, paraguas, tapasoles y otros; tubería y sus accesorios; vehículos y material de transporte; y vidrio y sus manufacturas.

#### Industria de extracción

Aluminio; gases industriales; hierro y acero; otros derivados del petróleo; productos minerales diversos; y Zinc.

<sup>7</sup>Los datos se encuentran en miles de US dólares (Comercio Exterior de Guatemala, s. f.).

### 6.2.2. Procedimiento de estimación

Puede resumirse en 6 pasos (Hyndman & Athanasopoulos, 2021):

1. Graficar los datos e identificar valores atípicos.
2. Si es necesario, transformar los datos para estabilizar su varianza.
3. Si es necesario, diferenciar los datos para tornarlos estacionarios.
4. Analizar autocorrelaciones en los datos para identificar los componentes de los modelos AR(p) y MA(q).
5. Estimar las diferentes configuraciones de ARIMA y compararlos usando el Criterio de Información de Akaike (AIC). Este mide la complejidad de los modelos y les asigna una ponderación. Se debe seleccionar el modelo con el menor valor de AIC.
6. Evaluar los residuos del modelo a través de un gráfico de autocorrelaciones y la prueba de portmanteau. Si los residuos no están autocorrelacionados el modelo es correcto.
7. Pronosticar.

O alternativamente utilizar la función “auto.arima()” del paquete “forecast” del lenguaje de programación R para obtener el modelo con menor AIC de forma iterativa; esta es la metodología que se usará durante la investigación. Adicionalmente, esta función realiza una prueba alternativa a la de Portmanteau para verificar la autocorrelación de los residuos:

#### Prueba de Ljung-Box

La prueba de Ljung – Box identifica si los residuos del modelo ARIMA se comportan como ruido blanco. De primero se calculan los valores rezagados del modelo y se determina si están correlacionados con los valores originales de ARIMA; con esto se crea la función de correlación (ACF). Después la prueba analiza los resultados en conjunto del ACF para validar las siguientes hipótesis (Bobbitt, 2020):

$H_0$ : Los residuos se distribuyen independientemente.

$H_1$ : Los residuos no se distribuyen independientemente y presentan autocorrelación.

Para realizar los pronósticos es necesario que los residuos se comporten como ruido blanco. En otras palabras, que se distribuyan independientemente por lo que no se debe rechazar  $H_0$  (p – value > 0.05).

La metodología se resume como:

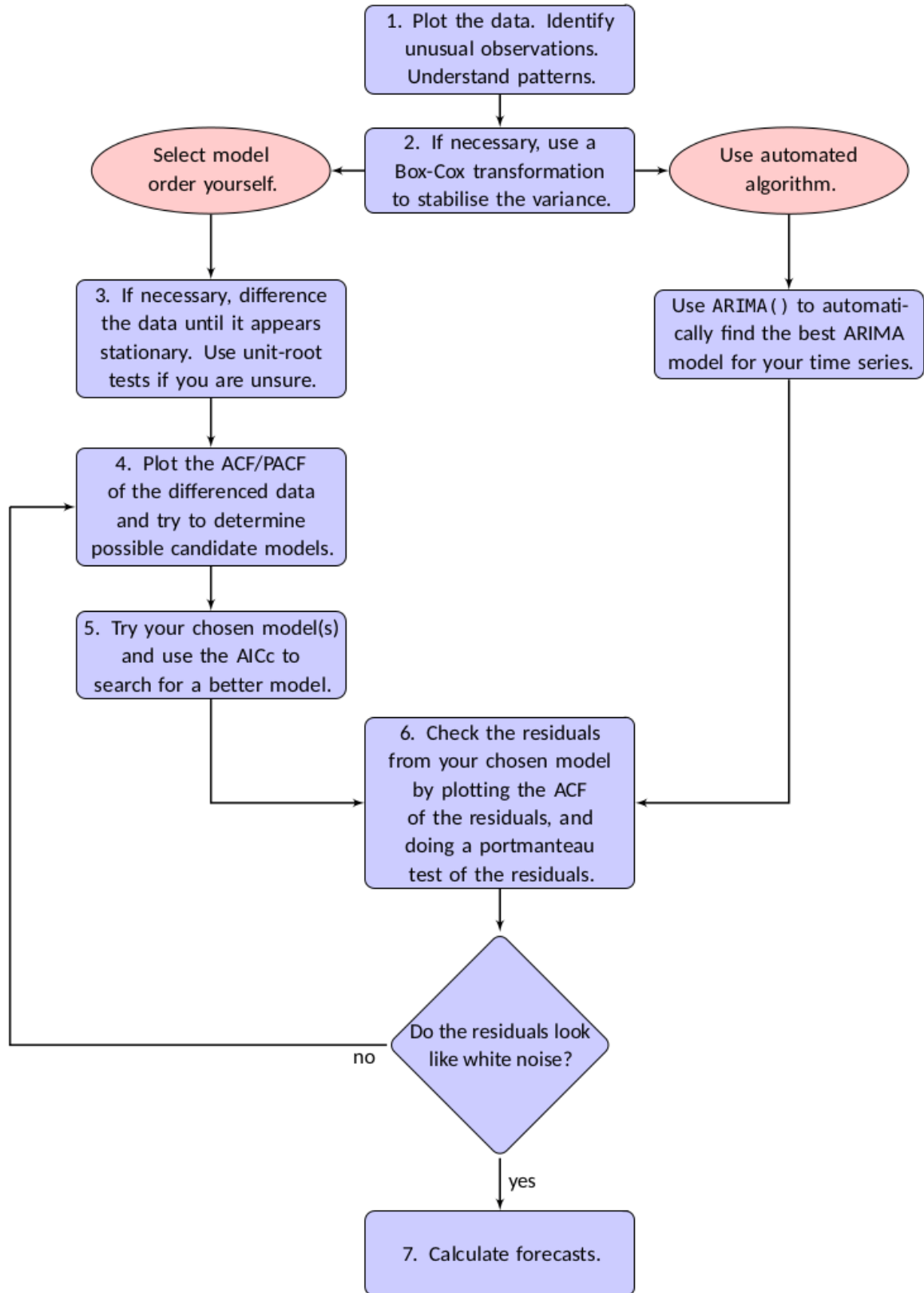


Figura 6.1. Diagrama de flujo del proceso de estimación del modelo ARIMA y los pronósticos de una serie de tiempo. Fuente: Hyndman & Athanasopoulos (2021)

### 6.3. Desarrollo de bases de datos

Cada estudio tiene una base de datos diferente. Comenzando con el modelo de gravitación, este lo componen cinco bases de datos: del Banco de Guatemala, Banco Mundial, Grupo del Banco Mundial, Centro de Estudios Prospectivos e Información Internacional y el proyecto Doing Bussines del Banco Mundial.

A pesar de ser diferentes, todas las bases contienen el mismo código de identificación para los países: ISO 3. Por lo tanto, fue posible juntar las bases usando este identificador a través de la función *left join* del lenguaje de programación R. Posteriormente, se eliminaron columnas repetidas, variables fuera del alcance de esta investigación y se transformó la estructura de la base de *wide format* a *long format* para que los métodos de estimación funcionen.

Para PPML se utilizó la función *fepois()* del paquete *fixest*. Se evitó el paquete *gravity* debido a la ausencia de variación de la distancia durante la primera fase. En este paquete, la separación es una variable integrada en la función *PPML()* que, al carecer de cambio, genera un error de cálculo.

El análisis de panel de efectos fijos se realizó con la función *plm()* del paquete *plm* con modelo = “within”. Para el modelo de selección de muestra de Heckman se desarrolló en base al cuadro 21 de *The gravity model of international trade: a user guide* (Shepherd, Doytchinova & Kravchenko, 2019, p. 54) que construye la ecuación de selección y de comercio.

Para los modelos autorregresivos, se usó la base de datos del comercio de Guatemala con Asia Oriental, concretamente la base de datos correspondientes a “País Origen” de Japón. Esto significa que el comercio bilateral no cuenta con terceros países como intermediarios para que los bienes de Japón llegaran a Guatemala. A cada producto se le asignó un número como identificador, con este se crearon bases individuales que contienen las exportaciones y/o importaciones de cada productos. Posteriormente se usó la función *auto.arima()* del paquete *forecast* del lenguaje de programación R para encontrar de forma iterativa los modelos ARIMA que se asemejan a la serie de tiempo.

Ambos modelos, los gravitacionales y autorregresivos, han sido extensamente aplicados a diferentes contextos. Sin embargo, pocos han tenido como foco a Guatemala o como estudio de caso a Japón y Guatemala. A continuación, se muestran cuatro que sí se centran en el país:

- En 2018 Melvin Gonzalo Mendoza Camposeco publicó *Evaluación del Impacto del Tratado de Libre Comercio (DR-CAFTA) sobre el flujo comercial de Guatemala*. Utilizó un modelo ingenuo compuesto de ocho variables (5 macroeconómicas, 1 sociocultural y 2 geográficas) para evaluar el efecto que ha tenido el TLC entre 1994 y 2017. Lo estima aplicando OLS y el análisis de panel de efectos fijos y aleatorios. Encontró que el tratado redujo las exportaciones guatemaltecas un 53.6% mientras que no tuvo un impacto significativo en las importaciones (Mendoza, 2018).
- En 2025 Gabriel Alejandro Fuentes Sandoval publicó *Patrones, Determinantes y Potencial del Comercio Internacional de Guatemala: Un Modelo Gravitacional*. Utilizó un modelo estructural y otro ingenuo donde incluye 4 variables macroeconómicas, 3 socioculturales y 2 geográficas. Las estimas usando mínimos cuadrados ordinarios agrupados (POLS), análisis de panel de efectos fijos y aleatorios y PPML. Encuentra que el comercio internacional guatemalteco es interindustrial donde se exportan productos distintos a los importados. Sin embargo, a nivel de Centroamérica está creciendo el comercio intraindustrial donde hay un intercambio de bienes similares (Fuentes, 2025).
- En 2023 José Jorge Zamora González publicó *Pronóstico del monto en dólares de la Exportación de Banano en Guatemala para el año 2024 a través del modelo con mayor grado de confiabilidad entre la metodología de ARIMA y Holt-Winters*. Utilizando los datos de la exportación de banano entre 1994 y 2021 aplica ambos modelos. Los dos proyectaron un crecimiento trimestral en la exportación, pero el ARIMA fue el más confiable porque presentó el menor error porcentual absoluto medio (MAPE) (Zamora, 2023).
- También en 2023 Cesar Fernando Castillo Posada publicó *Pronóstico de Importaciones de vehículos usados y venta de vehículos nuevos en Guatemala*. Usando los datos del Banco de Guatemala para el periodo de 2014 a 2020 encuentra que las importaciones de los vehículos usados para 2021 y 2022 corresponde a un modelo ARIMA (2,1,0) (0,1,1)<sup>12</sup>, mientras que las importaciones de vehículos nuevos se expresan como ARIMA (0,1,1) (Castillo, 2023).

## 8.1. Estudio I: comercio internacional de Guatemala a través del modelo de gravitación

### 8.1.1. Primera etapa: comercio bilateral

#### Guatemala (GTM) - Estados Unidos (USA)

Cuadro 8.1. Comercio bilateral entre Guatemala y Estados Unidos - periodo completo

Variables	PPML — Exp	PPML — Imp	P.EF — log(Exp)	P. EF — log(Imp)
	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.
(Intercepto)	14.2781*** (0.5330)	7.2223** (1.1187)	—	—
pv_USA	0.2298** (0.0739)	—	0.1860** (0.0583)	—
ge_GTM	-0.7714*** (0.1561)	-0.8412** (0.2913)	-0.8440** (0.2247)	-0.6227* (0.2727)
va_GTM	-0.2662* (0.1241)	—	—	—
log(PIB <sub>GTM</sub> )	0.2822*** (0.0232)	0.5957*** (0.0503)	0.2995*** (0.0371)	0.6130*** (0.0469)
Pseudo $R^2$ ajustado	0.8991	0.9391	—	—
$R^2$ ajustado	—	—	0.8901	0.9347
Heterocedasticidad	—	—	0.7049	0.7222
Prueba de Pregibon	0.4066	0.1525	—	—
Prueba RESET	—	—	1.0000	1.0000
Observaciones	22	22	22	22

Notas: Coeficientes en la fila superior y errores estándar entre paréntesis en la fila inferior.  
Los asteriscos indican significancia: \*\*\*  $p < 0.001$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*  $p < 0.05$ , ·  $p < 0.10$ .

Ambos métodos (PPML y el análisis de panel de efectos fijos) describen el comercio bilateral entre Guatemala y Estados Unidos en el periodo de 2002 a 2023. La prueba de enlace de Pregibon y de Reset de Ramsey no detectan problemas de especificación u omisión de variables y la varianza de los errores del análisis de panel no muestra heterocedasticidad.

Comenzando con las exportaciones, cuatro covariables fueron estadísticamente significativas. Un avance de 0.1 puntos en la *estabilidad política y ausencia de violencia* de Estados Unidos aumentó las exportaciones guatemaltecas en 2.33%, la *eficiencia gubernamental* de Guatemala y la *voz y rendición de cuentas* las redujeron un 7.43% y 2.63%; respectivamente, y aumento de 1% en el tamaño económico guatemalteco incrementó en 0.28% las exportaciones.

Para las importaciones, dos covariables fueron significativas. Un progreso de 0.1 puntos en la *eficiencia gubernamental* de Guatemala las redujo en 8.07%, mientras que un incremento de 1% en el tamaño del mercado guatemalteco aumentó las importaciones provenientes de EE. UU. en 0.60%.

Los resultados del análisis de panel de efectos fijos respaldan la robustez. Los signos y magnitudes son consistentes con PPML para las exportaciones e importaciones. En el caso de las exportaciones, es plausible que el efecto de la voz y rendición de cuentas quede absorbido por el resto de las variables de gobernanza.

## Guatemala (GTM) - México (MEX)

Cuadro 8.2. Comercio bilateral entre Guatemala y México - periodo completo

Variables	PPML — Exp	PPML — Imp	P.EF — log(Exp)	P.EF — log(Imp)
	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.
(Intercepto)	0.2711 (2.6961)	-1.5143 (1.6722)	—	—
ge_GTM	-1.6866** (0.6855)	-0.7510* (0.3317)	-1.1827· (0.5715)	—
rl_GTM	-1.3058** (0.4065)	—	—	—
rq_GTM	1.4500*** (0.4070)	0.8722** (0.2787)	—	—
va_GTM	2.0264*** (0.4896)	—	1.9353*** (0.4473)	—
log(PIB <sub>GTM</sub> )	0.7342*** (0.1197)	0.9101*** (0.0739)	0.8071*** (0.0944)	1.0246*** (0.0541)
Pseudo $R^2$ ajustado	0.8967	0.9622	—	—
$R^2$ ajustado	—	—	0.8457	0.9446
Heterocedasticidad	—	—	0.1762	0.8576
Prueba de Pregibon	0.9263	0.0106	—	—
Prueba RESET	—	—	0.0000	1.0000
Observaciones	22	22	22	22

Notas: Coeficientes en la fila superior y errores estándar entre paréntesis en la fila inferior.  
Los asteriscos indican significancia: \*\*\*  $p < 0.001$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*  $p < 0.05$ , ·  $p < 0.10$ .

El comercio bilateral entre Guatemala y México se modela con PPML para las exportaciones y con panel de efectos fijos para las importaciones. En ambos casos, las pruebas de especificación no encuentran problemas de forma funcional u omisión de variables. Además, los errores del análisis de panel presentan homocedasticidad.

Sobre las exportaciones, cinco covariables fueron estadísticamente significativas. Un avance de 0.1 punto en la *eficiencia gubernamental* de Guatemala redujo en 15.52% las exportaciones, el *Estado de derecho* las recortó un 12.24%, la *calidad regulatoria* las aumentó en 15.60% y la *voz y rendición de cuentas* las acrecentó un 22.46%. Adicionalmente, un incremento de 1% en el tamaño económico de guatemalteco elevó en 0.73% las exportaciones.

Una covariable fue significativa para las importaciones. Un incremento de 1% en el tamaño del mercado guatemalteco se relacionó con un aumento de 1.03% en las importaciones de México hacia Guatemala. Finalmente, es necesario resaltar que los dos resultados restantes no se pueden utilizar para hacer inferencias de robustez porque no superan la prueba de Pregibon y la prueba RESET.

## Guatemala (GTM) - Belice (BLZ)

Cuadro 8.3. Comercio bilateral entre Guatemala y Belice - periodo completo

Variables	PPML — Exp	PPML — Imp	P.EF — log(Exp)	P.EF — log(Imp)
	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.
(Intercepto)	-14.5907*** (3.1132)	14.1774*** (0.4708)	—	—
va_BLZ	-0.8702** (0.3088)	—	-0.7279* (0.3340)	4.0140* (1.6654)
ge_GTM	-0.8525* (0.3489)	—	-0.6909· (0.3691)	—
va_GTM	—	-4.5510** (1.4169)	—	—
log(PIB <sub>BLZ</sub> )	1.5191*** (0.1487)	—	1.6011*** (0.1832)	—
log(PIB <sub>GTM</sub> )	—	—	—	1.1160** (0.3674)
Pseudo $R^2$ ajustado	0.9589	0.4445	—	—
$R^2$ ajustado	—	—	0.9495	0.2577
Heterocedasticidad	—	—	0.0687	0.0261
Test de Pregibon	0.9379	0.8411	—	—
Test RESET	—	—	1.0000	0.0000
Observaciones	22	22	22	22

Notas: Coeficientes en la fila superior y errores estándar entre paréntesis en la fila inferior.  
Los asteriscos indican significancia: \*\*\*  $p < 0.001$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*  $p < 0.05$ , ·  $p < 0.10$ .

El comercio bilateral entre Guatemala y Belice se explica con PPML. La prueba de Pregibon no detecta una mala forma funcional para las exportaciones e importaciones; sin embargo, las últimas tuvieron un menor ajuste.

Comenzando con las exportaciones, tres covariables fueron estadísticamente significativas. Un progreso de 0.1 puntos en la *voz y rendición de cuentas* de Belice disminuyó un 8.33% las exportaciones, la *eficiencia gubernamental* de Guatemala las contrajo en 8.17% y un aumento de 1% en el tamaño del mercado beliceño elevó las exportaciones en 1.52%. Utilizando los resultados del análisis de panel notamos que los coeficientes mantienen los mismo signos y magnitud similares; esto respalda la robustez de los resultados.

Sobre las importaciones, únicamente la *voz y rendición de cuentas* de Guatemala es significativa, un avance de 0.1 puntos las redujo un 36.56%. A pesar de que el análisis de panel estima el efecto del tamaño del mercado guatemalteco, el método no pasa la prueba RESET de Ramsey y presenta heterocedasticidad en la varianza de los errores; por lo tanto, no debe usarse para inferencias.

## Guatemala (GTM) - El Salvador (SLV)

Cuadro 8.4. Comercio bilateral entre Guatemala y El Salvador - periodo completo

Variables	PPML — Exp	PPML — Imp	P.EF — log(Exp)	P.EF — log(Imp)
	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.
(Intercepto)	-11.2000*** (1.6670)	2.7766*** (0.7061)	—	—
va_SLV	—	-0.2739** (0.0980)	—	-0.2679** (0.0832)
log(PIBSLV)	1.3460*** (0.0701)	—	1.3843*** (0.0588)	—
log(PIBGTM)	—	0.7193*** (0.0288)	—	0.7235*** (0.0273)
Pseudo $R^2$ ajustado	0.9614	0.9749	—	—
$R^2$ ajustado	—	—	0.9635	0.9779
Heterocedasticidad	—	—	0.9220	0.1717
Prueba de Pregibon	0.2065	0.7134	—	—
Prueba RESET	—	—	1.0000	1.0000
Observaciones	22	22	22	22

Notas: Coeficientes en la fila superior y errores estándar entre paréntesis en la fila inferior.  
Los asteriscos indican significancia: \*\*\*  $p < 0.001$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*  $p < 0.05$ , ·  $p < 0.10$ .

El comercio bilateral entre Guatemala y El Salvador se aproxima mediante PPML y panel de efectos fijos. La prueba de enlace de Pregibon y RESET de Ramsey no observan problemas de forma funciona u omisión de variables, la varianza de los errores del análisis de panel es constantes y ambos métodos tiene un buen ajuste.

Únicamente el tamaño del mercado salvadoreño fue significativo para las exportaciones, un incremento de 1% en el tamaño se asoció con un aumento de 1.35% en el comercio. El modelo de panel reproduce el mismo signo y magnitud comparable lo que refuerza la robustez en el resultado.

Para las importaciones, dos covariables fueron significativas. Por un lado, un progreso de 0.1 puntos en la *voz y rendición de cuentas* de El Salvador redujo en 2.70% la compra de bienes y servicios salvadoreños; por otro, un incremento de 1% en el tamaño del mercado guatemalteco aumentó en 0.72% en las importaciones. Finalmente, el análisis de panel también reportó los mismos signos y magnitudes comparables validando la robustez.

## Guatemala (GTM) - Honduras (HND)

Cuadro 8.5. Comercio bilateral entre Guatemala y Honduras - periodo completo

Variables	PPML — Exp	PPML — Imp	P.EF — log(Exp)	P.EF — log(Imp)
	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.
(Intercepto)	-4.2757*** (0.9354)	-4.8964* (2.2778)	—	—
pv_HND	-0.5072* (0.1987)	-0.6990· (0.3808)	—	—
ge_GTM	-0.3479* (0.1705)	-1.2250** (0.4034)	-0.4845· (0.2507)	-0.9966* (0.4697)
rl_GTM	—	-1.1964* (0.5316)	—	-1.2142· (0.6191)
rq_GTM	0.7292* (0.3193)	1.9094*** (0.4214)	—	1.1455* (0.4920)
va_GTM	—	—	0.4683* (0.1925)	—
log(PIB <sub>HND</sub> )	1.0360*** (0.0398)	—	1.1133*** (0.0472)	—
log(PIB <sub>GTM</sub> )	—	0.9173*** (0.1085)	—	1.0153*** (0.0808)
Pseudo $R^2$ ajustado	0.9815	0.9570	—	—
$R^2$ ajustado	—	—	0.9768	0.9320
Heterocedasticidad	—	—	0.4070	0.4802
Prueba de Pregibon	0.7194	0.7232	—	—
Prueba RESET	—	—	0.0000	0.2210
Observaciones	22	22	22	22

Notas: Coeficientes en la fila superior y errores estándar entre paréntesis en la fila inferior.

Los asteriscos indican significancia: \*\*\*  $p < 0.001$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*  $p < 0.05$ , ·  $p < 0.10$ .

El comercio bilateral entre Guatemala y Honduras se caracteriza con PPML. Las exportaciones e importaciones pasan la prueba de enlace de Pregibon y tienen un buen ajuste. Adicionalmente, para las importaciones, el análisis de panel supera la prueba RESET de Ramsey y tiene varianza de los errores constante.

Comenzando con las exportaciones, cuatro covariables fueron significativas. 0.1 puntos de mejora en *estabilidad política y ausencia de violencia* de Honduras redujeron en 4.95 % las exportaciones, la *eficiencia gubernamental* de Guatemala las contrajo un 3.42 %, la *calidad regulatoria* guatemaltecas las aumentó en 7.56 % y un incremento de 1 % en el tamaño del mercado hondureño se asoció con un aumento de 1.04 % en las exportaciones guatemaltecas.

Siguiendo con las importaciones, cinco covariables fueron significativas. Un avance de 0.1 puntos en la *estabilidad política y ausencia de violencia* de Honduras mermó en 6.75 % las importaciones, la *eficiencia gubernamental* de Guatemala las redujo un 11.53 %, el *Estado de derecho* las acertó en 11.28 % y la *calidad regulatoria* de Guatemala acrecentó en 21.04 % las importaciones. Además, un incremento de 1 % en el tamaño del mercado guatemalteco se asoció con un crecimiento de 0.92 % sobre las importaciones hondureñas.

Por último, el análisis de panel valida el efecto general de las covariable sobre las importaciones. A pesar de omitir la estabilidad política y ausencia de violencia de Honduras, el resto de covariables

comparten los mismos signos, aunque difieren en sus coeficientes.

### Guatemala (GTM) - Países vecinos

Cuadro 8.6. Comercio internacional entre Guatemala y sus países vecino - periodo completo

Variable	PPML — Exp	PPML — Imp	P.EF — log(Exp)	P.EF — log(Imp)
	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.
(Intercepto)	2.0615 (1.9620)	-6.6711* (2.9791)	—	—
log(Dist)	-0.5149*** (0.0065)	-0.9886*** (0.0288)	—	—
ge_GTM	-0.6599*** (0.1977)	-0.4233** (0.1579)	-0.7581*** (0.2192)	—
rl_GTM	—	—	-0.4841 (0.2570)	—
rq_GTM	0.5774* (0.2258)	0.4993** (0.1615)	—	—
va_GTM	—	—	0.6678*** (0.1687)	-0.9068* (0.4044)
log(PIBG <sub>GTM</sub> )	0.7571*** (0.0798)	0.5909*** (0.1248)	0.5097*** (0.0796)	0.3860 (0.2023)
log(PIB <sub>Vecinos</sub> )	—	0.6297*** (0.0082)	0.5792*** (0.1310)	0.6722*** (0.3273)
Idioma_ español	2.4436*** (0.0147)	2.5700*** (0.0440)	—	—
Pseudo $R^2$ ajustado	0.9778	0.9881	—	—
$R^2$ ajustado	—	—	0.9850	0.6036
Heterocedasticidad	—	—	0.0052	0.0024
Prueba de Pregibon	0.5142	0.2437	—	—
Prueba RESET	—	—	0.3758	0.0000
Observaciones	88	88	88	88

Notas: Coeficientes en la fila superior y errores estándar entre paréntesis en la fila inferior.

Asteriscos: \*\*\*  $p < 0.001$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*  $p < 0.05$ , ·  $p < 0.10$ .

El comercio entre Guatemala y sus países vecinos (México, Belice, El Salvador y Honduras) para las exportaciones e importaciones es descrito por el método PPML. En ambos casos, la prueba de enlace de Pregibon no detectan una mala forma funcional y exhiben un buen ajuste. A pesar de que el análisis de panel de las exportaciones supera la prueba RESET de Ramsey, sus errores tienen heterocedasticidad y no debe usarse para inferencias.

Para las exportaciones, cinco covariables fueron significativas. Una mejora de 0.1 puntos en la *eficiencia gubernamental* de Guatemala redujo en 6.39% el flujo de exportaciones, mientras que la *calidad regulatoria* las aumentó en 5.94%. Un incremento de 1% en el tamaño económico guatemalteco se vinculó con un crecimiento de 0.76% sobre las exportaciones, mientras que los costos de transporte las contrajo en 0.52%. Por último, compartir el *idioma español* es una característica de México, El Salvador y Honduras, a ellos se les exportó 1,051.44% más respecto a Belice en el periodo de 2002 a 2023.

Continuando con las importaciones, seis covariables fueron significativas. Un avance de 0.1 puntos en la *eficiencia gubernamental* de Guatemala redujo un 4.14% las importaciones mientras que la *calidad regulatoria* aumentó en 5.12% las importaciones. Paralelamente, un incremento de 1% en el tamaño del mercado guatemalteco las elevó un 0.59%, mientras que el tamaño económico de los países vecino las acrecentó 0.63%. Inversamente, un incremento de 1% en los costos de transporte las redujo en 0.99%. Finalmente, se importó 1,206.58% más desde México, El Salvador y Honduras que de Belice.

## 8.1.2. Segunda etapa: comercio internacional

## Guatemala (GTM) - Mercado Común para África Oriental y Meridional (COMESA)

Cuadro 8.7. Comercio internacional entre Guatemala y COMESA - periodo completo

Variable	PPML — Exp	PPML — Imp	Panel EF — log(Exp)	Panel EF — log(Imp)	Heckman — log(Exp)	Heckman — log(Imp)
	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.
(Intercepto)	57.4702*** (7.6391)	-46.0709*** (12.7984)	—	—	-65.5823*** (11.0775)	10.8874*** (0.8287)
log(Dist)	-7.2961*** (0.9065)	—	—	—	—	—
pv_COMESA	-0.9946*** (0.3005)	1.1483*** (0.3310)	-0.6977 (0.3636)	—	—	—
va_COMESA	—	-0.6334*** (0.3279)	—	—	—	—
cc_GTM	—	-2.2713 (1.2338)	—	-2.1175* (0.7704)	—	—
log(PIBCOMESA)	0.9632*** (0.1002)	0.5789*** (0.2365)	1.1356*** (0.2892)	—	3.0288*** (0.4091)	—
log(PIBGTM)	—	1.5652* (0.4743)	—	—	—	—
AccesoMar	1.9459*** (0.5922)	2.1965* (1.0538)	—	—	—	1.8083*** (0.4795)
Pseudo $R^2$ ajustado	0.7219	0.5255	—	—	—	—
$R^2$ ajustado	—	—	0.0031	-0.0544	0.4209	0.1053
Heterocedasticidad	—	—	0.0597	0.1968	0.0008	0.0000
Heckman Mills	—	—	—	—	4.2685	-2.5511*
Prueba de Pregibon	0.4973	0.0056	—	—	—	—
Prueba RESET	—	—	0.0212	0.1325	0.0000	1
Observaciones	406	406	188	222	155	155

Notas: Coeficientes en la fila superior y errores estándar entre paréntesis en la fila inferior.

Asteriscos: \*\*\*  $p < 0.001$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*  $p < 0.05$ , ·  $p < 0.10$ .

Cuadro 8.8. Comercio internacional entre Guatemala y COMESA - periodo filtrado

Variable	PPML — Exp	PPML — Imp	Panel EF — log(Exp)	Panel EF — log(Imp)	Heckman — log(Exp)	Heckman — log(Imp)
	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.
(Intercepto)	71.3365** (23.2427)	-41.1636*** (11.8919)	—	—	-67.5319*** (15.5655)	9.9243*** (1.1262)
log(Dist)	-8.9594*** (2.2206)	—	—	—	—	—
pv_COMESA	-1.1955* (0.6087)	1.5707*** (0.4338)	—	—	—	—
va_COMESA	—	-0.7229 <sup>.</sup> (0.3846)	5.3747*** (0.8547)	—	—	—
cc_GTM	—	-2.3300*** (0.2806)	—	—	—	—
ge_GTM	—	—	12.3708*** (3.2809)	-14.9698* (5.9878)	—	—
rl_GTM	—	—	-6.0491 <sup>.</sup> (3.0884)	—	—	—
log(PIBCOMESA)	1.0281*** (0.1903)	0.4715* (0.2099)	2.1285** (0.5928)	—	3.1084*** (0.6126)	—
log(PIBGTM)	—	1.5718*** (0.5176)	—	-2.2611 <sup>.</sup> (1.1538)	—	—
AccesoMar	2.0976*** (0.4681)	3.1715* (1.4641)	—	—	—	1.9236** (0.9085)
Pseudo $R^2$ ajustado	0.7798	0.5725	—	—	—	—
$R^2$ ajustado	—	—	0.4240	-0.2125	0.4458	0.0561
Heterocedasticidad	—	—	0.1494	0.6449	0.4249	0.7955
Índice de Mills	—	—	—	—	3.1552	-0.3001
Prueba de Pregibon	0.7644	0.5969	—	—	—	—
Prueba RESET	—	—	0.0000	0.4414	0.0016	1.000
Observaciones	111	111	44	61	69	69

Notas: Coeficientes en la fila superior y errores estándar entre paréntesis en la fila inferior.

Asteriscos: \*\*\*  $p < 0.001$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*  $p < 0.05$ , <sup>.</sup>  $p < 0.10$ .

El comercio internacional entre Guatemala y los miembros de COMESA se explica con el método PPML. Se utilizaron dos grupos muestrales: para las exportaciones, el periodo completo 2002 a 2023 y para las importaciones, intervalos de cuatro años (2002, 2006, 2010, 2014, 2018 y 2022) que permiten que el comercio se ajuste a políticas o shocks comerciales. Ambas muestras pasan la prueba de enlace de Pregibon; no obstante, las importaciones pierden precisión debido al número reducido de observaciones.

Comenzando con las exportaciones, cuatro covariables fueron significativas. Un avance de 0.1 puntos en la *estabilidad política y ausencia de violencia* del COMESA redujo un 9.47% las exportaciones. Un incremento de 1% en el tamaño del mercado del bloque las elevó un 0.96% mientras que los costos de transporte las redujo 7.30%. Adicionalmente, a los países miembros del bloque con *acceso al mar* se les exportó un 600.00% más que a los miembros sin litoral.

Siguiendo con las importaciones, seis covariables fueron significativas. Un avance de 0.1 puntos en la *estabilidad política y ausencia de violencia* de COMESA las aumentó un 17.01%, en la *voz y rendición de cuentas* del bloque las mermó 6.97% mientras que en el *control de corrupción* de Guatemala las redujo un 20.79%. Un incremento de 1% en el tamaño económico de COMESA aumentó las importaciones en 0.47% mientras que en el tamaño del mercado guatemalteco las elevó un 1.57%. Por último, se importó 2,284.32% más de los países del bloque con *acceso al mar*.

Finalmente, se omiten los resultados del análisis de panel y de selección de muestra de Heckman. Ambos métodos estiman menos covariables y en algunos casos no superan la prueba de RESET de Ramsey, cuentan con heterocedasticidad en sus errores o presentan sesgos de selección (dado por el índice inverso de Mills) que limitan sus usos para inferencias.

## Guatemala (GTM) - Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN)

Cuadro 8.9. Comercio internacional entre Guatemala y TLCAN - periodo completo

Variable	PPML — Exp	PPML — Imp	P.EF — log(Exp)	P.EF — log(Imp)
	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.
(Intercepto)	-0.8628*** (1.9778)	-0.6349 (0.6916)	—	—
log(Dist)	-1.9525*** (0.3677)	-2.4455*** (0.0938)	—	—
va_TLCAN	0.7402* (0.3287)	—	—	—
ge_GTM	-0.3443* (0.1371)	—	—	—
va_GTM	0.5228*** (0.0888)	—	—	—
pv_TLCAN	—	—	—	-0.4059* (0.1703)
log(PIBTLCAN)	1.2331*** (0.0349)	1.4017*** (0.0624)	1.3840*** (0.1368)	1.2121*** (0.1515)
Pseudo $R^2$ ajustado	0.9794	0.9793	—	—
$R^2$ ajustado	—	—	0.6045	0.5753
Heterocedasticidad	—	—	0.0670	0.0003
Prueba de Pregibon	0.0602	0.1236	—	—
Prueba RESET	—	—	0.0000	0.4718
Observaciones	66	66	66	66

Notas: Coeficientes en la fila superior y errores estándar entre paréntesis en la fila inferior.

Asteriscos: \*\*\*  $p < 0.001$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*  $p < 0.05$ , ·  $p < 0.10$ .

Cuadro 8.10. Comercio internacional entre Guatemala y TLCAN - periodo filtrado

Variable	PPML — Exp	PPML — Imp	P.EF — log(Exp)	P.EF — log(Imp)
	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.
(Intercepto)	-0.0775*** (2.6639)	-1.7987· (0.7802)	—	—
log(Dist)	-2.3789*** (0.5885)	-2.6375*** (0.1146)	—	—
va_TLCAN	1.0978· (0.5731)	—	—	—
ge_GTM	-1.1554*** (0.1931)	—	—	—
va_GTM	0.6137*** (0.1843)	—	—	—
cc_GTM	0.3100*** (0.1051)	—	—	—
log(PIBTLCAN)	1.2887***	1.4918***	1.5122***	1.2294***

*Continúa en la siguiente página*

Cuadro 8.10. (continuación)

Variable	PPML — Exp	PPML — Imp	P.EF — log(Exp)	P.EF — log(Imp)
	Coef. (0.0461)	Coef. (0.0486)	Coef. (0.2007)	Coef. (0.2846)
Pseudo $R^2$ ajustado	0.9915	0.9814	—	—
$R^2$ ajustado	—	—	0.7597	0.4796
Heterocedasticidad	—	—	0.2746	0.0325
Prueba de Pregibon	0.0441	0.9967	—	—
Prueba RESET	—	—	0.0000	0.0000
Observaciones	18	18	18	18

Notas: Coeficientes en la fila superior y errores estándar entre paréntesis en la fila inferior.

Asteriscos: \*\*\*  $p < 0.001$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*  $p < 0.05$ , ·  $p < 0.10$ .

El comercio entre Guatemala y los países del TLCAN se caracteriza mediante PPML. Las exportaciones e importaciones pasaron la prueba de enlace de Pregibon y tienen un buen ajuste. En el análisis de panel, ninguna estimación supera la prueba RESET y de heterocedasticidad, por lo que no deben usarse para inferencias.

Cuatro covariables fueron significativas para las exportaciones. Un avance de 0.1 puntos en la *voz y rendición de cuentas* del TLCAN aumentó un 7.68 % las exportaciones, la *voz y rendición de cuentas* de Guatemala las acrecentó 5.37 % mientras que en la *eficiencia gubernamental* de Guatemala las redujo en 3.38 %. Un incremento de 1 % en el tamaño del mercado del boque las aumentó 1.23 % mientras que este incremento en los costos de transporte las redujo en 1.95 %.

Para las importaciones, dos covariables fueron significativas. Un incremento de 1 % en el tamaño económico del bloque las aumentó en 1.40 % mientras que en los costos de transporte las recortó un 2.45 %. Finalmente, es necesario mencionar que el método de estimación de Heckman no fue necesario para ningún grupo muestral debido a que siempre hubo un registro de comercio entre Guatemala y sus miembros; en otras palabras, no hubo omisión de observaciones.

## Guatemala (GTM) - Mercado Común del Sur (MERCOSUR)

Cuadro 8.11. Comercio internacional entre Guatemala y MERCOSUR - periodo completo

Variable	PPML — Exp	PPML — Imp	Panel EF — log(Exp)	Panel EF — log(Imp)	Heckman — log(Exp)
	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.
(Intercepto)	5.4811 (6.2509)	12.9737*** (2.0090)	—	—	-1.2747 (3.7042)
log(Dist)	-2.1162*** (0.2809)	-1.9802*** (0.1631)	—	—	-2.9057*** (0.3425)
va_MERCOSUR	1.5441** (0.5333)	1.3955*** (0.1548)	—	—	—
cc_GTM	1.0611*** (0.1560)	—	1.0185** (0.3195)	—	—
ge_GTM	-1.4160* (0.1337)	-1.0701*** (0.4318)	—	—	—
rl_GTM	-0.5858** (0.2120)	-1.6722 (0.9213)	—	—	—
rq_GTM	1.4446** (0.2120)	—	1.0158 (0.5614)	—	—
log(PIBMERCOSUR)	0.3977*** (0.1076)	0.6650*** (0.0630)	0.4140* (0.1830)	—	1.4167*** (0.1007)
log(PIBGTM)	0.7261** (0.2244)	—	1.6771*** (0.2559)	0.9034*** (0.1281)	—
AccesoMar	—	1.7715* (0.6959)	—	—	—
Pseudo $R^2$ ajustado	0.7818	0.8779	—	—	—
$R^2$ ajustado	—	—	0.6707	0.1165	0.7111
Heterocedasticidad	—	—	0.1133	0.7113	0.0000
Heckman Mills	—	—	—	—	-7.655
Prueba de Pregibon	0.0170	0.0002	—	—	—
Prueba RESET	—	—	0.0044	0.2334	0.0000
Observaciones	277	286	277	280	182

Notas: Coeficientes en la fila superior y errores estándar entre paréntesis.

Asteriscos: \*\*\*  $p < 0.001$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*  $p < 0.05$ , ·  $p < 0.10$ .

Cuadro 8.12. Comercio internacional entre Guatemala y MERCOSUR - periodo filtrado

Variable	PPML — Exp	PPML — Imp	P.EF — log(Exp)	P.EF — log(Imp)
	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.
(Intercept)	9.5812*** (2.4821)	13.7431*** (1.9474)	—	—
log(Dist)	-2.1118*** (0.3560)	-1.9526*** (0.1918)	—	—
va_MERCOSUR	1.3574 (0.6945)	1.4410*** (0.1630)	—	—
cc_GTM	1.4010*** (0.2291)	—	1.4934** (0.5092)	—
ge_GTM	-4.0443* (1.8370)	-1.7056* (0.6765)	—	—
rq_GTM	1.1872*** (0.0075)	—	—	—
log(PIB <sub>MERCOSUR</sub> )	0.3982*** (0.1052)	0.6629*** (0.0561)	—	—
log(PIB <sub>GTM</sub> )	0.5135*** (0.1001)	—	2.1708*** (0.2005)	1.3411*** (0.2829)
AccesoMar	—	2.1017*** (0.5865)	—	—
Pseudo $R^2$ ajustado	0.7837	0.8645	—	—
$R^2$ ajustado	—	—	0.6334	0.1108
Heterocedasticidad	—	—	0.1832	0.4339
Prueba de Pregibon	0.0600	0.0500	—	—
Prueba RESET	—	—	0.9581	0.2218
Observaciones	76	78	76	78

Notas: Coeficientes en la fila superior y errores estándar entre paréntesis en la fila inferior.

Asteriscos: \*\*\*  $p < 0.001$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*  $p < 0.05$ , ·  $p < 0.10$ .

El comercio internacional entre Guatemala y los miembros del MERCOSUR se estiman mediante PPML y el análisis de panel de efectos fijos sobre la muestra de intervalos de cuatro años debido a que superan la prueba de Pregibon, de Ramsey y de heterocedasticidad. Se excluyen los resultados del modelo de selección de Heckman para las exportaciones ya que no se omitieron observación y para las importaciones el método no convergió.

Comenzando con las exportaciones, siete covariables fueron significativas. Un avance de 0.1 puntos en la *voz y rendición de cuentas* del MERCOSUR las elevó 14.54 %, para el *control de corrupción* de Guatemala aumentó en 15.04 %, en la *calidad regulatoria* del país crecieron un 12.61 % mientras que la *eficiencia gubernamental* de Guatemala contrajo las exportaciones en 33.26 %. Paralelamente, un incremento de 1 % en el tamaño económico guatemalteco las aumentó en 0.51 %, en el tamaño del mercado del MERCOSUR las acrecentó un 0.40 % y en los costos de transporte disminuyó en 2.11 % las exportaciones.

Para el análisis de panel, dos covariables fueron significativas y tuvieron un buen ajuste. Un progreso de 0.1 puntos en el *control de corrupción* de Guatemala elevó las exportaciones en 16.11 % mientras que un incremento de 1 % en el tamaño económico guatemalteco las favoreció en 2.17 %.

Siguiendo con las importaciones, cinco covariables fueron significativas. Un avance de 0.1 puntos en la *voz y rendición de cuentas* del MERCOSUR las acrecentó en 15.50 % mientras que la *eficiencia*

*gubernamental* de Guatemala redujo en 15.68 % las importaciones. Un incremento de 1 % en el tamaño económico de MERCOSUR aumentó las importaciones en 0.66 % mientras que los costos de transporte las redujeron en 1.95 %. Adicionalmente, se importó 718.01 % más de los países del bloque con *acceso al mar* en contraste con los que no lo tienen.

Finalmente, para el análisis de panel únicamente el tamaño del mercado guatemalteco fue significativo para las importaciones. Un incremento de 1 % estuvo relacionado con una elevación de 1.34 % sobre las importaciones del bloque hacia el país.

## Guatemala (GTM) - Asociación de Naciones de Asia Sudoriental más 3 (ASEAN3)

Cuadro 8.13. Comercio internacional entre Guatemala y ASEAN3 - periodo completo

Variable	PPML — Exp	PPML — Imp	Panel EF — log(Exp)	Panel EF — log(Imp)	Heckman — log(Exp)	Heckman — log(Imp)
	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.
(Intercepto)	11.3180 (21.7911)	31.0451 (28.0029)	—	—	35.8340 (37.0927)	-103.2578*** (19.8228)
log(Dist)	-3.1728 (1.8592)	-4.2093 (2.5301)	—	—	-7.8893** (2.7596)	6.1016*** (1.8178)
pv_ASEAN3	—	-0.7209** (0.2435)	—	-0.5295 (0.2909)	0.9343* (0.4447)	—
va_ASEAN3	0.1943* (0.0911)	—	—	—	1.1538* (0.5333)	—
cc_GTM	—	-0.8187*** (0.2002)	—	—	—	—
ge_GTM	—	-1.0585*** (0.0710)	—	—	—	—
rl_GTM	—	-0.2420*** (0.0478)	—	-4.3124** (1.5005)	—	—
va_GTM	—	—	4.4803*** (1.0039)	—	—	—
log(PIB <sub>ASEAN3</sub> )	0.5222*** (0.1424)	0.6811*** (0.1706)	1.1478** (0.3454)	1.3888*** (0.1483)	—	2.2788*** (0.1331)
log(PIB <sub>GTM</sub> )	0.5981*** (0.1625)	—	1.0042* (0.4142)	—	2.2649* (0.9421)	—
MismoColonizador	-1.6154*** (0.3046)	-4.0577*** (0.4948)	—	—	—	—
AccesoMar	7.1513*** (0.5214)	7.7134*** (0.7072)	—	—	—	—
Pseudo $R^2$ ajustado	0.7957	0.9222	—	—	—	—
$R^2$ ajustado	—	—	0.3536	0.2668	0.2424	0.7452
Heterocedasticidad	—	—	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Índice de Mills	—	—	—	—	-0.9952	1.7355**
Prueba de Pregibon	0.2371	0.0656	—	—	—	—
Prueba RESET	—	—	0.9912	0.0337	0.0000	0.0000
Observaciones	286	286	229	241	163	163

Notas: Coeficientes en la fila superior y errores estándar entre paréntesis en la fila inferior.

Asteriscos: \*\*\*  $p < 0.001$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*  $p < 0.05$ , ·  $p < 0.10$ .

Cuadro 8.14. Comercio internacional entre Guatemala y ASEAN3 - periodo filtrado

Variable	PPML — Exp	PPML — Imp	Panel EF — log(Exp)	Panel EF — log(Imp)	Heckman — log(Exp)	Heckman — log(Imp)
	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.
(Intercepto)	46.2709 (24.4371)	-21.0887*** (2.4660)	—	—	85.4348 (43.2011)	-130.9527*** (46.0556)
log(Dist)	-6.6336*** (2.0145)	—	—	—	-7.1996 (4.4826)	7.8755 (4.2022)
pv_ASEAN3	—	—	—	-0.9498* (0.4669)	—	—
va_ASEAN3	—	—	—	—	1.6267* (0.7432)	—
cc_GTM	—	-0.9631*** (0.0809)	—	—	—	—
rl_GTM	—	—	—	-3.8578 (2.1497)	—	—
log(PIB <sub>ASEAN3</sub> )	0.3257 (0.1821)	0.9770*** (0.1108)	1.4251*** (0.2823)	1.4231*** (0.2364)	—	2.6597*** (0.3202)
log(PIB <sub>GTM</sub> )	0.7611*** (0.2154)	—	—	—	—	—
MismoColonizador	-1.0416** (0.3680)	—	—	—	—	—
AccesoMar	6.7567*** (0.2953)	12.1541*** (0.8969)	—	—	—	—
Pseudo $R^2$ ajustado	0.7591	0.8747	—	—	—	—
$R^2$ ajustado	—	—	0.01811	0.3529	0.2288	0.7051
Heterocedasticidad	—	—	0.8161	0.0002	0.0003	0.0008
Índice de Mills	—	—	—	—	-0.8545	2.3031
Prueba de Pregibon	0.8424	0.2429	—	—	—	—
Prueba RESET	—	—	0.0000	0.0686	0.0132	0.0000
Observaciones	78	78	62	65	44	44

Notas: Coeficientes en la fila superior y errores estándar entre paréntesis en la fila inferior.

Asteriscos: \*\*\*  $p < 0.001$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*  $p < 0.05$ , ·  $p < 0.10$ .

El comercio internacional entre Guatemala y los países de ASEAN3 se estiman con PPML para las exportaciones e importaciones. Ambos superan la prueba de enlace de Pregibon y tiene un buen ajuste. En contraste, la prueba de RESET y de heterocedasticidad identifica omisión de variable y problemas de varianza en los errores del resto de los métodos de estimación.

Comenzando con las exportaciones, cinco covariables fueron significativas. Un progreso de 0.1 puntos en la *voz y rendición de cuentas* de ASEAN3 aumentó en 1.96% las exportaciones, un incremento de 1% en el tamaño del mercado del bloque las elevó en 0.52%, el tamaño económico guatemalteco las aumentó un 0.60% y los costos de transporte las recortaron en 3.17%. Además, a los miembros con *acceso al mar* se les vendió 127,475.34% más que a su contraparte; finalmente, a Indonesia (país *colonizado por España*) se le exportó 80.12% menos que al resto de los miembros del bloque.

Para las importaciones, ocho covariables fueron significativas. Un avance de 0.1 puntos en la *estabilidad política* del bloque las redujo en 6.96%, el *control de corrupción* de Guatemala, su *eficiencia gubernamental* y el *Estado de derecho* las mermó en 7.86%, 10.04% y 2.39%; respectivamente. En contraste, un incremento de 1% en el tamaño económico de ASEAN3 las acrecentó un 0.68% mientras que en los costos de transporte disminuyeron en 4.21% las importaciones. Adicionalmente, la compra a miembros con *salida al mar* fue 223,713.90% mayor que al resto. Por último, desde *Indonesia* se importaron 98.25% menos que del resto de los miembros de ASEAN3.

## Guatemala (GTM) - Unión Europea (UE)

Cuadro 8.15. Comercio internacional entre Guatemala y UE - periodo completo

Variable	PPML — Exp	PPML — Imp	Panel EF — log(Exp)	Panel EF — log(Imp)	Heckman — log(Exp)	Heckman — log(Imp)
	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.
(Intercepto)	36.6865*** (4.4071)	-17.0247*** (2.8030)	—	—	-49.92*** (4.1810)	-36.6046*** (7.7793)
va_UE	—	1.1255** (0.4271)	-1.8139** (0.6438)	—	—	1.3540*** (0.3070)
cc_GTM	—	-0.3445*** (0.0701)	—	—	—	—
log(PIB <sub>UE</sub> )	0.8132*** (0.1387)	0.7593*** (0.1175)	—	—	2.2858*** (0.1618)	1.1192*** (0.0677)
log(PIB <sub>GTM</sub> )	1.1351*** (0.1123)	0.4399*** (0.1515)	1.1984*** (0.1421)	1.3130*** (0.0928)	—	0.8314** (0.2960)
Idioma_ español	—	1.0813*** (0.1986)	—	—	—	—
AccesoMar	3.8822*** (0.4892)	1.6121*** (0.3143)	—	—	3.9516*** (0.5280)	1.3133*** (0.2292)
Pseudo $R^2$ ajustado	0.6223	0.7959	—	—	—	—
$R^2$ ajustado	—	—	0.1907	0.2380	0.5542	0.6353
Heterocedasticidad	—	—	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Índice de Mills	—	—	—	—	-4.537	-3.362**
Prueba de Pregibon	0.0000	0.5175	—	—	—	—
Prueba RESET	—	—	0.7744	0.8313	0.0000	0.0045
Observaciones	572	572	494	559	380	380

Notas: Coeficientes en la fila superior y errores estándar entre paréntesis en la fila inferior.

Asteriscos: \*\*\*  $p < 0.001$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*  $p < 0.05$ , ·  $p < 0.10$ .

Cuadro 8.16. Comercio internacional entre Guatemala y la UE - periodo filtrado

Variable	PPML — Exp Coef.	PPML — Imp Coef.	Panel EF — log(Exp) Coef.	Panel EF — log(Exp) Coef.	Heckman — log(Exp) Coef.
(Intercepto)	-38.0915*** (0.0111)	-12.7872*** (1.8653)	—	—	-54.0238*** (6.2722)
va_UE	—	1.2207** (0.4527)	-3.9567** (1.4723)	—	1.3540*** (0.3070)
cc_GTM	—	-0.7294*** (0.2061)	—	—	—
log(PIB <sub>UE</sub> )	0.8033*** (0.1452)	0.7011*** (0.1194)	—	—	2.4211*** (0.2423)
log(PIB <sub>GTM</sub> )	1.1951*** (0.1423)	0.3207** (0.1200)	1.3483*** (0.2766)	1.3829*** (0.1827)	—
Idioma_español	—	1.1627*** (0.2133)	—	—	—
AccesoMar	4.1035*** (0.5093)	1.5590*** (0.3491)	—	—	4.3223*** (0.8881)
Pseudo $R^2$ ajustado	0.6210	0.7851	—	—	—
$R^2$ ajustado	—	—	0.0980	0.1716	0.5866
Heterocedasticidad	—	—	0.0470	0.0029	0.0000
Índice de Mills	—	—	—	—	-2.8610
Prueba de Pregibon	0.0098	0.6611	—	—	—
Prueba RESET	—	—	0.1833	0.6603	0.0000
Observaciones	156	156	133	152	101

Notas: Coeficientes en la fila superior y errores estándar entre paréntesis en la fila inferior.

Asteriscos: \*\*\*  $p < 0.001$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*  $p < 0.05$ , ·  $p < 0.10$ .

Para el comercio internacional entre Guatemala y la UE, únicamente las importaciones fueron explicadas mediante PPML ya que superan la prueba de enlace de Pregibon y tiene un buen ajuste. Por su parte, el resto de los métodos de estimación no superan las pruebas de especificación de ningún grupo muestral.

Seis covariables fueron significativas para las importaciones. Un avance de 0.1 puntos en la *voz y rendición de cuentas* de la UE aumentó en 11.91 % las importaciones, mientras que en el *control de corrupción* de Guatemala las contrajo un 3.39 %, un incremento de 1 % en el tamaño del mercado guatemalteco las elevó en 0.44 %, mientras que el tamaño económico de la UE las aumentó un 0.76 %. Además, las importaciones de los miembros con *acceso al mar* fue 401.33 % superiores a la de los miembros sin litoral y de *España* se importó un 194.85 % más que del resto de miembros.

Adicionalmente, los resultados de la segunda muestra comparten mismos signos y coeficientes similares dándole robustez a los resultados. Por último, es necesario resaltar que en este modelo la distancia no fue significativa para ninguna muestra, el efecto de los costos de transporte es absorbido por el resto de covariables.

### Guatemala (GTM) - Acuerdo comercial para estrechar las relaciones económicas entre Australia y Nueva Zelanda (ANZCERTA)

Cuadro 8.17. Comercio internacional entre Guatemala y ANZCERTA - periodo completo

Variable	PPML — Exp	PPML — Imp	P.EF — log(Exp)	P.EF — log(Imp)
	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.
(Intercepto)	41.7861*** (0.1065)	45.3342*** (2.4083)	—	—
log(Dist)	-8.7611*** (0.8423)	-3.6279*** (0.1224)	—	—
pv_ANZCERTA	—	—	1.8897* (0.8149)	—
cc_GTM	—	—	1.0931 (0.5774)	-1.3434 (0.6992)
ge_GTM	—	-2.7703*** (0.5113)	—	—
rl_GTM	—	-3.3640* (1.3764)	—	—
log(PIB <sub>ANZCERTA</sub> )	0.8007*** (0.0664)	—	—	2.0898** (0.7565)
log(PIB <sub>GTM</sub> )	1.4243*** (0.2533)	—	2.6279*** (0.2458)	-1.9492** (0.7044)
Pseudo $R^2$ ajustado	0.6235	0.4574	—	—
$R^2$ ajustado	—	—	0.8205	0.08610
Heterocedasticidad	—	—	0.0159	0.0122
Prueba de Pregibon	0.014	0.007	—	—
Prueba RESET	—	—	0.0000	0.025
Observaciones	44	44	44	44

Notas: Coeficientes en la fila superior y errores estándar entre paréntesis en la fila inferior.

Asteriscos: \*\*\*  $p < 0.001$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*  $p < 0.05$ , ·  $p < 0.10$ .

Cuadro 8.18. Comercio internacional entre Guatemala y ANZCERTA - periodo filtrado

Variables	PPML — Exp	PPML — Imp	P.EF — log(Exp)	P.EF — log(Imp)
	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.
(Intercepto)	11.7107*** (0.1241)	37.5099*** (9.4656)	—	—
log(Dist)	-5.090*** (1.0078)	-2.8635** (1.0247)	—	—
cc_GTM	—	—	—	-2.2213** (0.6511)
ge_GTM	—	-3.3263* (1.3121)	—	—
rl_GTM	—	-3.7456*** (0.1736)	—	—
log(PIB <sub>ANZCERTA</sub> )	0.4393*** (0.0061)	—	—	—
log(PIB <sub>GTM</sub> )	1.6300*** (0.3882)	—	2.2776*** (0.4224)	—
Pseudo $R^2$ ajustado	0.5026	0.8049	—	—
$R^2$ ajustado	—	—	0.7111	0.3878
Heterocedasticidad	—	—	0.0711	0.1416
Prueba de Pregibon	0.3548	0.9023	—	—
Prueba RESET	—	—	0.8482	0.7057
Observaciones	12	12	12	12

Notas: Coeficientes en la fila superior y errores estándar entre paréntesis en la fila inferior.

Asteriscos: \*\*\*  $p < 0.001$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*  $p < 0.05$ , ·  $p < 0.10$ .

El comercio internacional entre Guatemala y los miembros de ANZCERTA se estima con PPML, únicamente la muestra de intervalos pasa la prueba de enlace de Pregibon y tienen un buen ajuste. Los resultados del análisis de panel pasan la prueba RESET y de heterocedasticidad, pero solo estima una variable para las exportaciones e importaciones. Adicionalmente, no se estimó el método de selección de Heckman debido a que no se omitió ninguna observación en el periodo de 2002 a 2023.

Comenzando, tres covariables fueron significativas para las exportaciones. Un incremento de 1 % en el tamaño económico guatemalteco aumentó en 1.63 % las exportaciones; similarmente, el tamaño del mercado de ANZCERTA las elevó un 0.44 %, mientras que los costos de transporte las contrajo en 5.09 %. En el análisis de panel, el tamaño económico de Guatemala creció las exportaciones un 2.28 %.

Siguiendo con las importaciones, tres covariables fueron significativas. Un progreso de 0.1 puntos en la *eficiencia gubernamental* de Guatemala las disminuyó un 28.29 %, el *Estado de derecho* las redujo en 31.24 % y un incremento de 1 % en los costos de transporte comprimió en 2.86 % las importaciones. Para los efectos fijos, el progreso en el *control de corrupción* de Guatemala redujo las importaciones un 19.92 %.

## Modelo estructural: comercio entre Guatemala y los principales bloques comerciales a nivel continental

Cuadro 8.19. Comercio entre Guatemala y los principales bloques comerciales - periodo completo

Variable	PPML — Exp	PPML — Imp	Panel EF — log(Exp)	Panel EF — log(Imp)	Heckman — log(Exp)	Heckman — log(Imp)
	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.
(Intercepto)	33.4538*** (2.4336)	30.7896*** (2.7638)	—	—	35.6881*** (2.2715)	15.6051*** (0.2232)
log(Dist)	-1.9913*** (0.2961)	-1.6549*** (0.3599)	-1.3103*** (0.0810)	-0.9458*** (0.1054)	-2.4933*** (0.2529)	—
COMESA	—	-1.7491* (0.9398)	-1.1172*** (0.2208)	-1.2450*** (0.2600)	-2.9176*** (0.4704)	-2.2414*** (0.3328)
ANZCERTA	1.2878** (0.4576)	1.5938* (0.7362)	1.9336*** (0.4271)	4.5000*** (0.5324)	—	—
TLCAN	3.7953*** (0.6082)	4.4329*** (0.6016)	4.1435*** (0.3550)	5.8723*** (0.4469)	—	—
MERCOSUR	—	1.4423* (0.5858)	—	0.7036* (0.2929)	—	-2.1310*** (0.4566)
ASEAN3	2.9579*** (0.6200)	4.3430*** (1.0386)	2.2828*** (0.2079)	4.4296*** (0.2540)	3.8081*** (0.5265)	2.2097*** (0.3840)
UE	1.8540*** (0.5498)	1.9242** (0.7083)	0.4752*** (0.1472)	3.0462*** (0.1780)	—	—
Misma_frontera	-2.2225** (0.6998)	-1.9615** (0.6950)	—	—	-2.1715* (0.9998)	—
Idioma_español	0.7731* (0.3105)	1.0019 (0.5223)	2.5911*** (0.3126)	3.6374*** (0.3037)	2.7950*** (0.7461)	4.1494*** (0.4113)
MismoColonizador	-1.1165** (0.3976)	-1.2514* (0.6419)	-1.2545*** (0.3091)	—	-1.7537* (0.7161)	—
Pseudo $R^2$ Ajustado	0.7554	0.7056	—	—	—	—
$R^2$ Ajustado	—	—	0.2826	0.3470	0.2189	0.3286
Heterocedasticidad	—	—	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Índice de Mills	—	—	—	—	-1.3642**	-4.4449***
Prueba de Pregibon	0.000	0.000	—	—	—	—
Prueba RESET	—	—	0.1471	0.7723	0.0000	0.0128
Observaciones	3850	3850	2697	2687	2458	2458

Notas: Coeficientes en la fila superior y errores estándar entre paréntesis.

Asteriscos: \*\*\*  $p < 0.001$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*  $p < 0.05$ , ·  $p < 0.10$ .

Cuadro 8.20. Comercio entre Guatemala y los principales bloques comerciales - periodo filtrado

Variable	PPML — Exp	PPML — Imp	Panel EF — log(Exp)	Panel EF — log(Imp)	Heckman — log(Exp)	Heckman — log(Imp)
	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.
(Intercepto)	33.5948*** (2.4355)	31.0822*** (2.5392)	—	—	31.8364*** (3.2781)	15.4920*** (0.4112)
log(Dist)	-2.0105*** (0.2976)	-1.6936*** (0.3320)	-1.1817*** (0.1524)	-0.9154*** (0.2039)	-2.1027*** (0.3673)	—
COMESA	—	—	-1.2368** (0.4359)	-0.9657 (0.5092)	-4.1726*** (0.8934)	-1.7433** (0.6512)
ANZCERTA	1.2613** (0.4031)	1.8346** (0.6497)	1.4332 (0.8010)	4.6167*** (1.0484)	—	—
TLCAN	3.8060*** (0.6120)	4.4894*** (0.5662)	4.0856*** (0.6681)	5.7583*** (0.8738)	—	—
MERCOSUR	—	1.4856** (0.5655)	—	—	—	-2.5690** (0.8599)
ASEAN3	3.0522*** (0.6265)	4.4661*** (0.9644)	2.0713*** (0.3861)	4.1666*** (0.5000)	3.6741*** (0.9521)	2.2098** (0.7290)
UE	1.8903*** (0.5569)	2.0430** (0.6629)	—	3.0180*** (0.3471)	—	—
Misma_frontera	-2.2364** (0.6973)	-1.9973** (0.6622)	—	—	—	—
Idioma_español	0.8309*** (0.2663)	0.9914 (0.5291)	2.4401*** (0.5889)	3.9261*** (0.4750)	1.7978* (0.8869)	4.3241*** (0.7655)
MismoColonizador	-1.1853** (0.3653)	-1.2800* (0.6404)	-1.1007 (0.5794)	—	—	—
Pseudo $R^2$ ajustado	0.7469	0.6951	—	—	—	—
$R^2$ ajustado	—	—	0.2685	0.3183	0.2321	0.2918
Heterocedasticidad	—	—	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Índice de Mills	—	—	—	—	-0.430	-4.032
Prueba de Pregibon	0.007065	0.009417	—	—	—	—
Prueba RESET	—	—	0.8466	0.02153	0.0015	0.3076
Observaciones	1050	1050	714	729	656	656

Notas: Coeficientes en la fila superior y errores estándar entre paréntesis en la fila inferior.

Asteriscos: \*\*\*  $p < 0.001$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*  $p < 0.05$ , ·  $p < 0.10$ .

Ningún método explicó el comercio internacional entre Guatemala con los principales bloques comerciales a través del modelo estructural. Para ambos grupos muestrales, PPML cuenta con una mala forma funcional y la varianza de los errores del análisis de panel y del método de Heckman presentan heterocedasticidad; no deben usarse para inferencias.

A pesar de esto, es necesario ejemplificar la interpretación de los resultados. Es diferente al modelo ingenuo ya que se realiza en comparación con un grupo de referencia; en este caso, los países que no pertenecen a ninguno de los bloques mencionados. Usando los coeficientes del análisis de panel para las exportaciones del periodo filtrados se encuentra que: “las exportaciones hacia *COMESA* fueron 70.97% inferiores que la de los países ajenos a los bloques, para *ANZCERTA* fueron 319.13% superiores, hacia el *TLCAN* 5,847.76% mayores y para *ASEAN3* 693.28% superiores.”

Los porcentajes se encuentran con la ecuación 6.22 con un *factor* de 1. Los acrónimos son binarios que marcan la pertenencia (1) o ausencia (0) de un país a uno de los bloques; sin embargo, no son semielasticidades. Son resistencias multilaterales que engloban el efecto de las variables macroeconómicas y de gobernanza de sus miembros.

## 8.1.3. Tercera etapa: comercio mundial

Cuadro 8.21. Comercio internacional de Guatemala - periodo completo

Variable	PPML — Exp	PPML — Imp	Panel EF — log(Exp)	Panel EF — log(Imp)	Heckman — log(Exp)	Heckman — log(Imp)
	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.
(Intercepto)	7.6075* (3.8144)	-1.3392 (2.5337)	—	—	-12.6696 (7.9171)	-11.9400*** (1.3938)
log(Dist)	-1.9893*** (0.1256)	-1.3651*** (0.0950)	-2.3536*** (0.0792)	-1.2146*** (0.092)	-3.1616*** (0.1922)	-1.2284*** (0.1251)
pv_Mundial	0.3627* (0.1574)	0.4629** (0.1449)	—	0.4629*** (0.071)	-0.4156*** (0.1117)	0.4982*** (0.0887)
va_Mundial	-0.3253* (0.1475)	-0.5052*** (0.1322)	-0.3187*** (0.0467)	0.3546*** (0.073)	—	0.4010*** (0.0972)
rq_GTM	0.1259*** (0.0304)	-0.3869*** (0.0588)	—	—	—	—
log(PIBMundial)	0.7419*** (0.0373)	0.9414*** (0.0417)	0.9472*** (0.0209)	1.3569*** (0.024)	1.3392*** (0.0984)	1.4025*** (0.0552)
log(PIBGTM)	0.2640 (0.1451)	0.2074* (0.0860)	—	—	0.7731* (0.3190)	—
Idioma_español	0.4289* (0.1873)	0.8189*** (0.2271)	0.7563** (0.2344)	2.2009*** (0.317)	—	2.8689*** (0.2188)
MismoColonizador	-0.8206*** (0.2151)	—	-0.8892*** (0.2252)	0.6325* (0.290)	—	—
AccesoMar	1.3052*** (0.4586)	1.2315* (0.5572)	1.8795*** (0.124)	1.330*** (0.138)	2.4408*** (0.3127)	1.5019*** (0.1801)
Misma_frontera	-1.2245*** (0.3341)	-0.8461** (0.2984)	-1.1283*** (0.297)	0.827* (0.345)	-2.3279** (0.7880)	1.4717** (0.4488)
Colonizador	—	—	—	-1.2048* (0.607)	—	—
Pseudo $R^2$ ajustado	0.9132	0.9162	—	—	—	—
$R^2$ ajustado	—	—	0.6093	0.6857	0.5146	0.6844
Heterocedasticidad	—	—	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Índice de Mills	—	—	—	—	-1.9885***	0.54200
Prueba de Pregibon	0.13550	0.08030	—	—	—	—
Prueba RESET	—	—	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Observaciones	3815	3815	2682	2673	2451	2451

Notas: Coeficientes en la fila superior y errores estándar entre paréntesis en la fila inferior.

Asteriscos: \*\*\*  $p < 0.001$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*  $p < 0.05$ , ·  $p < 0.10$ .

Cuadro 8.22. Comercio internacional de Guatemala - periodo filtrado

Variable	PPML — Exp	PPML — Imp	P.EF — log(Exp)	P.EF — log(Imp)
	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.
(Intercepto)	5.7469* (2.9222)	-4.3025 (3.1405)	—	—
log(Dist)	-1.9984*** (0.1376)	-1.3542*** (0.0963)	-2.0971*** (0.0945)	-1.4273*** (0.1427)
pv_Mundial	0.3636* (0.1701)	0.5041*** (0.1505)	—	0.3999** (0.1352)
va_Mundial	-0.3199* (0.1379)	-0.5205** (0.1336)	-0.2897*** (0.0834)	0.4152** (0.1378)
log(PIBMundial)	0.7374*** (0.0411)	0.9350*** (0.0438)	0.9120*** (0.0377)	1.3879*** (0.0479)
log(PIBGTM)	0.3556*** (0.1046)	0.3303*** (0.0839)	—	—
Idioma_español	0.4665* (0.1852)	0.7614*** (0.2324)	—	2.3864*** (0.3372)
MismoColonizador	-0.8766*** (0.1950)	—	—	—
AccesoMar	1.0624* (0.4865)	1.3961** (0.5336)	1.8993*** (0.2407)	1.1538*** (0.2705)
Misma_frontera	-1.2123*** (0.3519)	-0.7764* (0.3116)	—	—
Pseudo $R^2$ ajustado	0.9096	0.9160	—	—
$R^2$ ajustado	—	—	0.5937	0.6799
Heterocedasticidad	—	—	0.0000	0.0000
Prueba de Pregibon	0.3539	0.1667	—	—
Prueba RESET	—	—	0.2429	0.0000
Observaciones	1039	1039	712	725

Notas: Coeficientes en la fila superior y errores estándar entre paréntesis en la fila inferior.

Asteriscos: \*\*\*  $p < 0.001$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*  $p < 0.05$ , ·  $p < 0.10$ .

El comercio internacional de Guatemala entre 2002 y 2023 es descrito con PPML, las exportaciones e importaciones pasan la prueba de enlace de Pregibon y tienen un buen ajuste. El resto de los métodos de estimación no superan las pruebas de especificación por lo que no deben usarse para inferencias.

Para las exportaciones diez covariables fueron significativas. Comenzando con las macroeconómicas, un incremento de 1% en el tamaño del mercado mundial aumentó un 0.74% las exportaciones guatemaltecas y el tamaño económico del país las elevó 0.26%. Sobre las de gobernanza, un avance de 0.1 puntos en la *estabilidad política y ausencia de violencia* a nivel global aumentó en 3.70% las exportaciones, la *voz y rendición de cuentas* internacional las disminuyó un 3.20% y la *calidad regulatoria* de Guatemala las acrecentó en 1.27%.

Continuando con las socioculturales, a los países con *idioma oficial español* se le exportó un 52.65% más que al resto, mientras que a los países *colonizados por España* un 56.00% menos. Por último, para las variables geográficas, los países con *acceso al mar* se les exportó un 268.84% más que a los sin litoral, *compartir frontera* con Guatemala las redujo en 70.60% y un incremento de 1% en los costos de transporte disminuyó las exportaciones guatemaltecas en 1.99%.

Para las importaciones, nueve covariable fueron significativas. En las macroeconómicas, un incremento de 1 % en el tamaño económico mundial aumentó un 0.94 % las importaciones hacia Guatemala y este incremento en el tamaño del mercado del país las elevó en 0.21 %. Para la gobernanza, un progreso de 0.1 puntos en la *estabilidad política y ausencia de violencia* a nivel mundial acrecentó las importaciones un 4.74 %, la *voz y rendición de cuentas* mundial las redujo en 4.93 % y la *calidad regulatoria* de Guatemala las disminuyó un 3.80 %.

Socioculturalmente, *compartir el idioma español* las aumentó un 126.82 %. Geográficamente, los países con *acceso al mar* importaron 242.64 % más a Guatemala que los países sin litoral y un aumento de 1 % en los costos de transporte redujo las importaciones en 1.37 %. Finalmente, los resultados de la población muestral de intervalos valida los resultados, las covariables comparten los mismos signos y magnitudes similares dándole robustez a los resultados.

## 8.2. Estudio II: pronóstico de las exportaciones e importaciones entre Japón y Guatemala

### 8.2.1. Industria agropecuaria: café

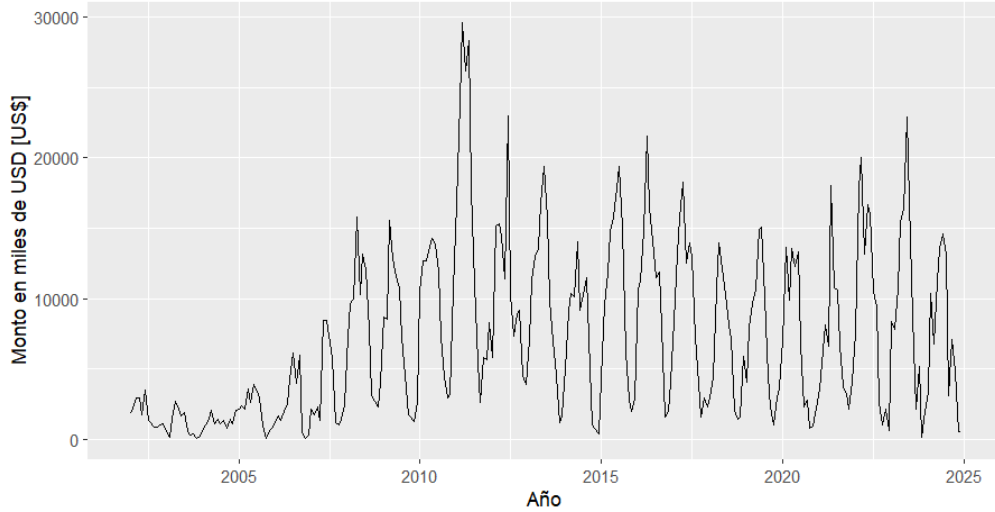


Figura 8.1. Exportación mensual de café hacia Japón (elaboración propia)

La serie mensual de exportaciones de café hacia Japón en el periodo de 2002 a 2024 no es estacionaria. Se aplicó la transformación Box – Cox ( $\lambda = 0.086$ ) para estabilizar la varianza y se realizó una diferenciación regular y otra estacional para eliminar la tendencia anual (los picos y valles). Previo a estimar se ajustó el sesgo de la transformación utilizando “biasadj = True” de la función “auto.arima()”, esta encontró que las exportaciones son descritas por:

$$\text{ARIMA}(0, 1, 3)(2, 1, 0)_{12}$$

Correspondiente a:

$$(1 + 0.6329 \cdot B^{12} + 0.3464 \cdot B^{24})(1 - B)(1 - B^{12})y_t = (1 - 0.5529 \cdot B - 0.0910 \cdot B^2 - 0.2010 \cdot B^3)\epsilon_t \quad (8.1)$$

Sus residuos son estacionarios. La primera gráfica muestra que los residuos están centrados en cero y carecen de una tendencia explícita; adicionalmente, el gráfico de la función de autocorrelación (ACF) no muestra autocorrelaciones significativas y el histograma de residuos es mayormente simétrico a excepción de algunos datos atípicos en la cola inferior. Para validar lo observado se realizó la prueba Ljung – Box ( $p = 0.244$ ) que no rechaza la hipótesis nula; por lo tanto, los residuos pueden considerarse como ruido blanco. En conjunto muestran que el modelo SARIMA está bien especificado.

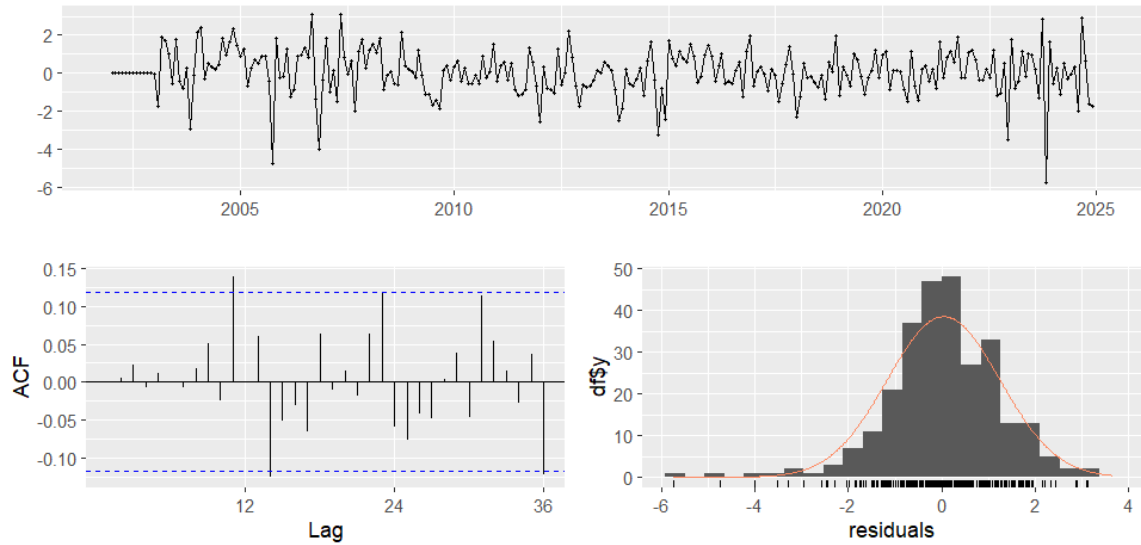


Figura 8.2. Gráfica de residuos (superior), gráfico ACF (inferior izquierdo) e histograma de residuos (inferior derecho) del modelo ARIMA (0,1,3)(2,1,0)[12] (elaboración propia)

Por su parte, los pronósticos sí modela la tendencial anual. Se tiene un 80 % de probabilidad de que las exportaciones entre 2025 y 2027 estén dentro del área azul y 95% de probabilidad de que estén en el área celeste.

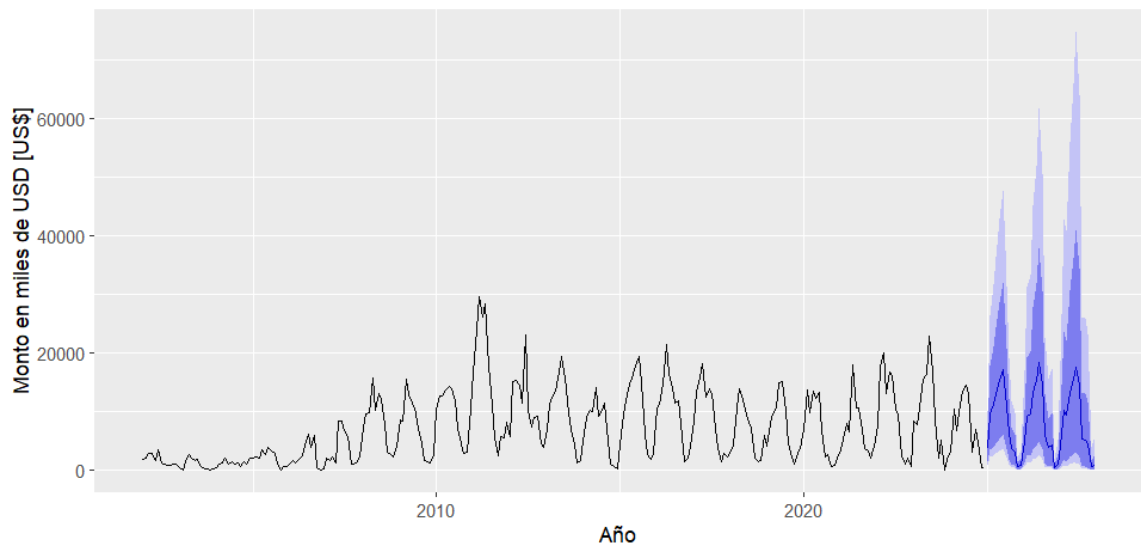


Figura 8.3. Pronósticos de exportaciones de café (elaboración propia)

A detalle sobre las pronosticaciones por mes:

Cuadro 8.23. Pronóstico mensual de exportación de café con intervalos del 80 % y 95 %

Periodo	Point Forecast	Lo 80	Hi 80	Lo 95	Hi 95
Jan 2025	3723.5098	1385.844 81	6839.4890	873.003 71	10 083.167
Feb 2025	9686.2927	3568.253 29	17 862.5011	2237.703 93	26 417.535
Mar 2025	11 228.2879	3949.796 41	21 068.8228	2427.488 50	31 601.762
Apr 2025	12 927.5748	4565.756 86	24 221.4602	2810.952 27	36 286.507
May 2025	15 312.1688	5447.193 48	28 612.1506	3364.236 07	42 770.168
Jun 2025	17 118.7834	6097.081 70	31 973.8617	3767.558 45	47 778.159
Jul 2025	13 115.8814	4487.967 10	24 861.7542	2725.115 27	37 603.386
Aug 2025	6272.2928	1945.661 36	12 307.4240	1131.894 39	19 163.229
Sep 2025	3680.8252	1053.647 05	7418.2404	591.856 77	11 820.890
Oct 2025	3019.1081	830.860 43	6162.0548	458.764 29	9929.224
Nov 2025	630.4459	135.032 01	1386.0710	66.813 37	2391.273
Dec 2025	871.7152	193.975 77	1896.0977	97.601 24	3238.225
Jan 2026	4884.5884	1226.284 41	10 256.7987	650.483 97	16 954.712
Feb 2026	9258.6546	2435.835 24	19 165.5356	1318.793 77	31 273.751
Mar 2026	9662.1990	2470.197 87	20 177.5539	1320.765 85	33 187.496
Apr 2026	13 369.0330	3515.587 79	27 678.0559	1902.999 59	45 170.072
May 2026	15 346.6404	4042.454 10	31 755.7094	2189.809 05	51 800.381
Jun 2026	18 374.9098	4879.160 05	37 927.2519	2652.338 96	61 729.287
Jul 2026	14 649.9071	3700.167 48	30 706.2335	1967.946 07	50 673.880
Aug 2026	6015.1645	1298.188 38	13 196.7226	644.487 80	22 721.529
Sep 2026	3902.3269	766.921 02	8782.8303	365.365 75	15 496.745
Oct 2026	4400.7326	865.861 99	9901.5507	412.710 02	17 465.487
Nov 2026	381.7875	44.472 33	974.7287	16.751 83	1955.085
Dec 2026	1111.5878	160.578 35	2702.2696	66.699 48	5149.880
Jan 2027	4211.6414	666.284 20	10 017.8428	288.271 39	18 671.786
Feb 2027	10 223.2596	1805.699 22	23 658.6187	820.546 47	42 899.303
Mar 2027	9420.6763	1560.965 03	22 154.3589	689.461 50	40 820.960
Apr 2027	13 160.8589	2263.465 53	30 663.0198	1016.466 64	55 974.476
May 2027	15 534.0220	2685.456 10	36 145.0148	1208.746 21	65 896.037
Jun 2027	17 621.0252	3040.732 88	41 019.8756	1367.557 15	74 817.492
Jul 2027	14 604.1231	2367.621 99	34 529.8357	1035.626 38	63 969.807
Aug 2027	5335.5136	679.524 11	13 353.4189	266.612 53	26 228.338
Sep 2027	5209.0783	640.951 06	13 138.4126	247.561 11	26 016.769
Oct 2027	4544.0214	526.008 92	11 617.1475	197.569 50	23 335.315
Nov 2027	580.4344	37.242 48	1674.5557	10.580 98	3833.837
Dec 2027	949.3809	68.131 18	2679.8363	20.438 41	5990.499

## 8.2.2. Industria manufacturera: vehículos, material de transporte y artículos de vestuario

### Vehículos y material de transporte

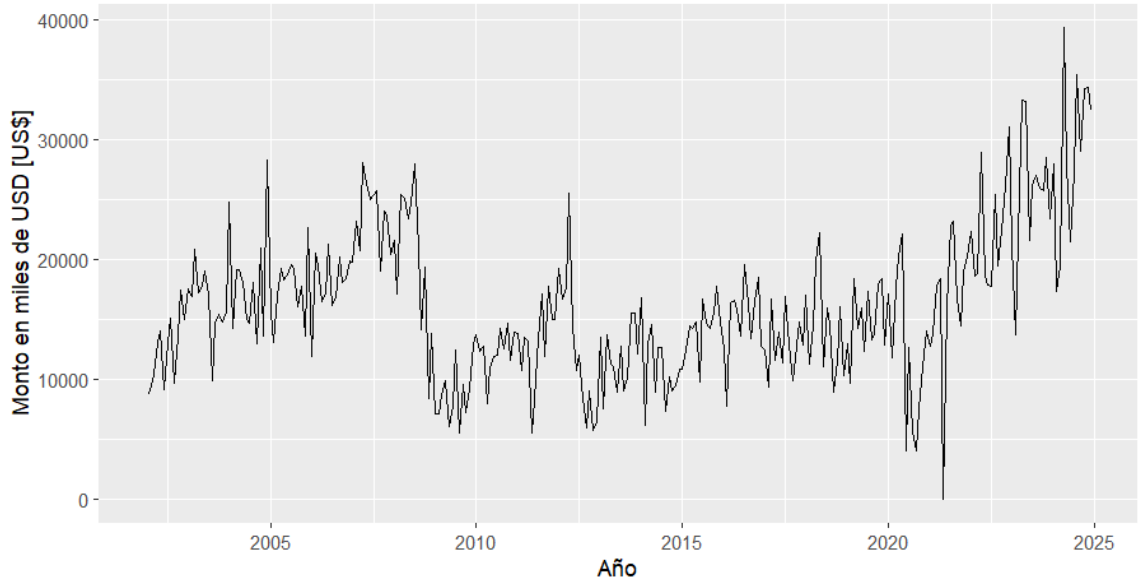


Figura 8.4. Importación mensual de vehículos y material de transporte (elaboración propia)

La serie mensual de las importaciones de vehículos y material de transporte de Japón hacia Guatemala en el periodo de 2002 a 2024 no tiene una tendencia aparente. Debido a esto solo se realizó una diferenciación normal para volverlos estacionarios y la transformación de Box – Cox ( $\lambda = 0.5206$ ) para estabilizar la varianza. Con esto la función “auto.arima()” estableció que las importaciones pueden modelarse como:

$$\text{ARIMA } (0,1,1)(2,0,0)_{12}$$

Equivalente a:

$$(1 - 0.0986 \cdot B^{12} - 0.1073 \cdot B^{24}) (1 - B) y_t = (1 - 0.6825 \cdot B) \epsilon_t \quad (8.2)$$

Sin embargo, el modelo está mal especificada. A pesar de que los residuos están centrados en cero, el gráfico de la función ACF muestra una autocorrelación significativa y el histograma de los residuos está sesgado hacia la izquierda. Por último, la prueba Ljung – Box rechaza la hipótesis nula ( $p = 0.0416$ ) implicando que los residuos no se distribuyen de forma independiente. En pocas palabras, el resultado de SARIMA no puede utilizarse para hacer pronósticos.

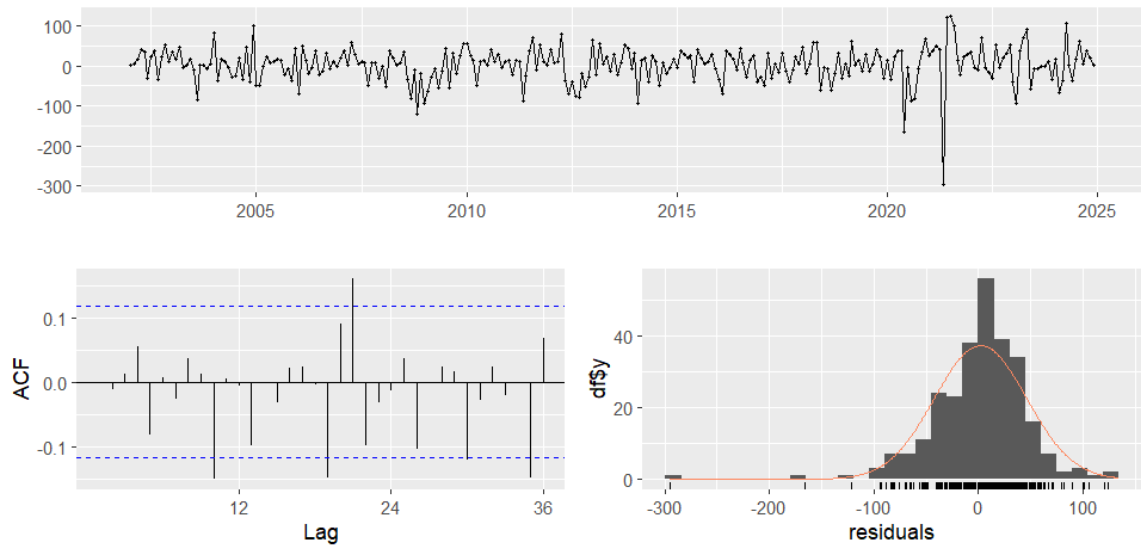


Figura 8.5. Gráfica de residuos (superior), gráfico ACF (inferior izquierdo) e histograma de residuos (inferior derecho) del modelo ARIMA  $(0,1,1)(2,0,0)[12]$  de la importación de vehículos y material de transporte (elaboración propia)

## Artículos de vestuario

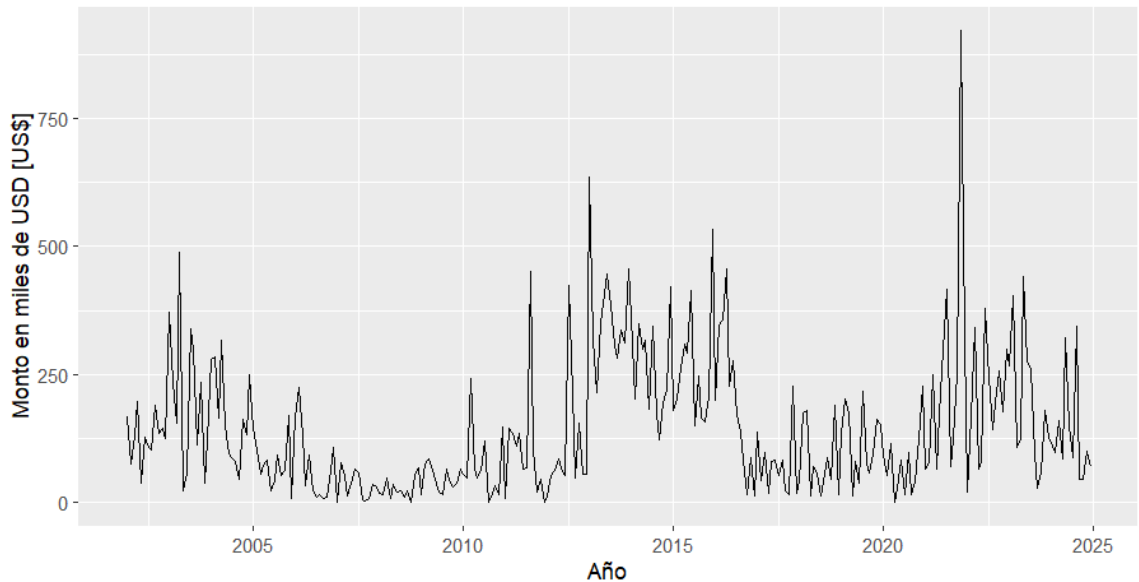


Figura 8.6. Exportación mensual de artículos de vestuario hacia Japón (elaboración propia)

La serie mensual de las exportaciones de artículos de vestuario hacia Japón en el periodo de 2002 a 2024 no cuentan con una tendencia aparente. Únicamente se realizó una diferenciación normal y la transformación de Box – Cox ( $\lambda = 0.1706$ ) para volverla estacionaria y ajustar la varianza. Tras corregir el sesgo, la función “auto.arima()” encuentra que las exportaciones también se expresan por:

$$\text{ARIMA } (0,1,1)(2,0,0)_{12}$$

Correspondiente a:

$$(1 - 0.1328 \cdot B^{12} - 0.1436 \cdot B^{24}) (1 - B) y_t = (1 - 0.7928 \cdot B) \epsilon_t \quad (8.3)$$

El modelo está bien especificado. A diferencia del de vehículos y material de transporte, los residuos están centrados en cero, el gráfico ACF no muestra autocorrelaciones y el histograma está levemente sesgado hacia la izquierda. Adicionalmente, la prueba Ljung – Box no rechaza la hipótesis nula ( $p = 0.3681$ ), por lo que los residuos se consideran ruido blanco. El seasonal ARIMA puede utilizarse para las pronosticaciones.

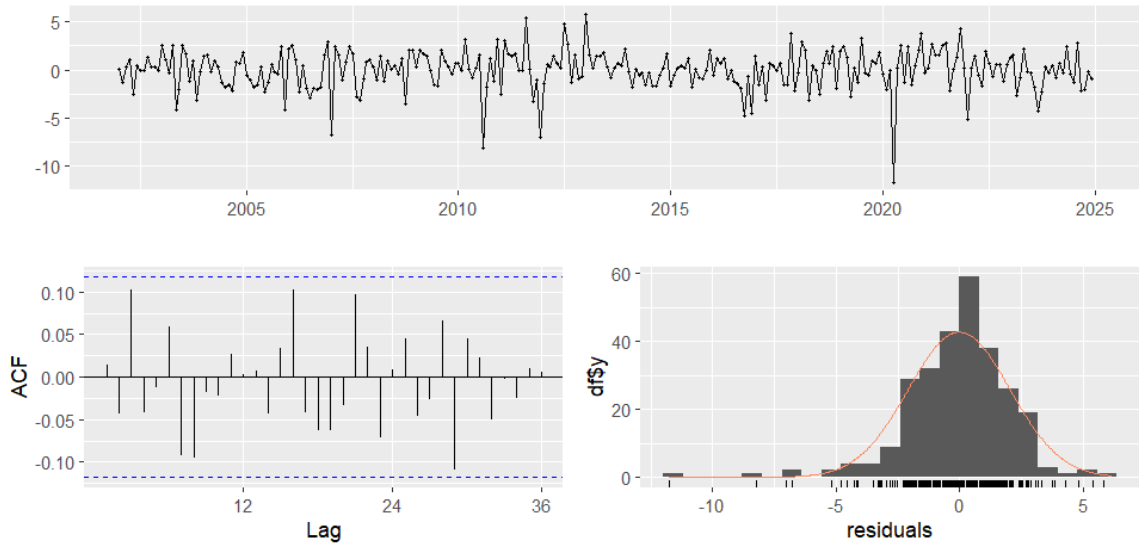


Figura 8.7. Gráfica de residuos (superior), gráfico ACF (inferior izquierdo) e histograma de residuos (inferior derecho) del modelo ARIMA (0,1,1)(2,0,0)[12] (elaboración propia)

Sobre el gráfico de pronósticos, se espera que el 95% de las importaciones se incluyan en el área celeste mientras que 80% en el área azul. Los valores esperados por mes se muestran a continuación:

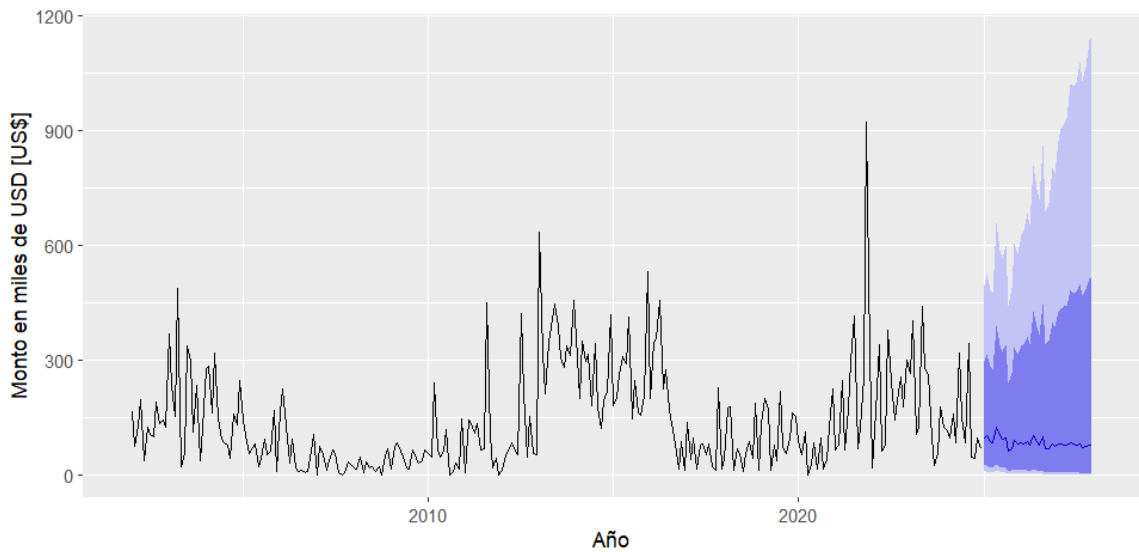


Figura 8.8. Pronósticos de exportaciones de artículos de vestuario (elaboración propia)

Cuadro 8.24. Pronóstico mensual de exportación de artículos de vestuario - intervalos del 80 % y 95 %

Periodo	Point Forecast	Lo 80	Hi 80	Lo 95	Hi 95
Jan 2025	98.747 38	25.423 057	296.9883	10.654 657 7	493.9345
Feb 2025	103.452 89	26.103 476	315.2762	10.770 113 6	527.1380
Mar 2025	89.084 43	20.895 509	284.6211	8.139 758 4	484.9324
Apr 2025	83.805 40	18.698 677	276.4063	6.997 599 5	476.8888
May 2025	124.944 35	30.257 067	391.0796	12.088 323 2	660.8989
Jun 2025	102.972 79	22.915 195	340.1864	8.557 392 1	587.3118
Jul 2025	94.537 01	19.894 718	323.4402	7.098 234 2	566.1078
Aug 2025	99.087 29	20.526 546	342.3344	7.229 111 3	601.4616
Sep 2025	62.391 05	10.762 283	240.7368	3.243 066 4	441.3007
Oct 2025	69.027 63	11.943 973	265.8594	3.608 922 9	487.0169
Nov 2025	90.365 71	16.627 814	335.5594	5.299 355 0	606.2031
Dec 2025	81.840 99	14.131 942	315.5926	4.262 326 0	578.3874
Jan 2026	84.497 02	13.635 492	338.9607	3.873 189 6	630.5444
Feb 2026	82.594 32	12.736 190	340.0945	3.472 381 6	638.8725
Mar 2026	87.378 25	13.270 089	362.9315	3.568 049 2	683.9848
Apr 2026	78.926 70	11.111 568	342.1203	2.785 393 1	655.0480
May 2026	102.854 66	15.494 880	429.1778	4.135 597 3	810.2162
Jun 2026	88.364 91	12.117 272	388.6699	2.963 254 9	748.1917
Jul 2026	80.305 55	10.219 980	367.9716	2.327 043 6	719.0327
Aug 2026	100.993 77	13.654 974	447.6941	3.294 973 7	864.2854
Sep 2026	69.595 17	7.744 051	342.5650	1.543 631 1	686.9252
Oct 2026	70.422 37	7.600 154	352.2115	1.468 480 2	710.3092
Nov 2026	81.403 48	9.064 863	400.5294	1.808 298 9	803.0434
Dec 2026	76.517 36	8.000 246	389.0275	1.496 122 9	789.1566
Jan 2027	80.665 31	7.851 014	425.3982	1.361 976 4	874.1860
Feb 2027	80.981 02	7.560 356	436.1079	1.254 424 8	902.8247
Mar 2027	79.807 70	7.082 726	440.7603	1.112 182 3	920.5377
Apr 2027	78.029 29	6.555 073	442.7061	0.968 588 5	933.3046
May 2027	85.835 47	7.265 366	485.2089	1.082 617 0	1021.6053
Jun 2027	81.659 70	6.453 983	477.1818	0.890 023 6	1016.2965
Jul 2027	79.603 64	5.947 976	477.7826	0.768 691 7	1026.9665
Aug 2027	82.681 81	6.051 937	501.1097	0.763 449 8	1080.6953
Sep 2027	73.581 03	4.828 249	469.1704	0.534 137 2	1029.3999
Oct 2027	74.750 94	4.745 766	483.8618	0.504 056 5	1067.0347
Nov 2027	79.218 96	4.995 000	514.3849	0.526 015 7	1135.5357
Dec 2027	77.441 62	4.620 588	515.5118	0.453 917 9	1147.5533

### 8.2.3. Industria de extracción: hierro y acero

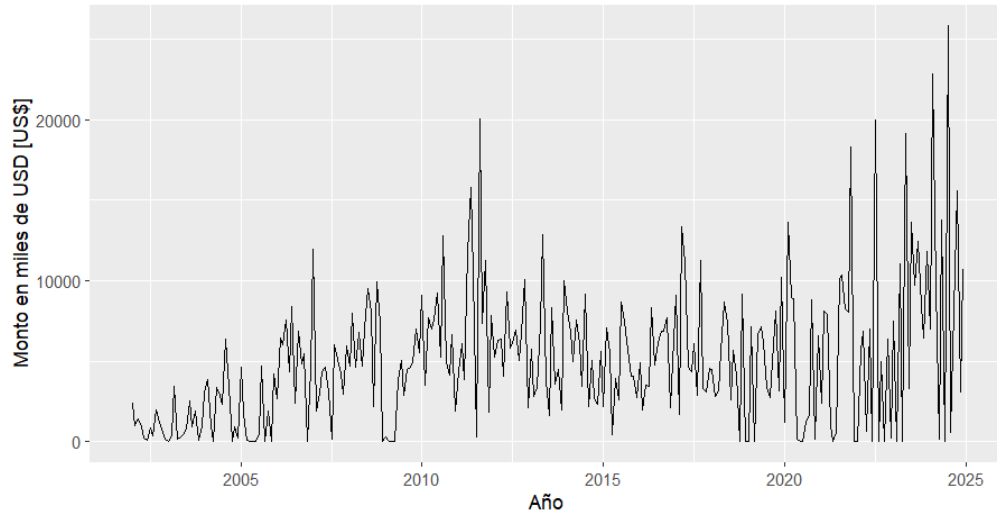


Figura 8.9. Importación mensual de hierro y acero de Japón (elaboración propia)

La serie mensual de las importaciones de hierro y acero de Japón hacia Guatemala en el periodo de 2002 a 2024 carece de una tendencia aparente, por lo que se omite la diferenciación estacional. Solo se realizó una diferenciación regular y la transformación Box – Cox ( $\lambda = 0.2358$ ). Con esta, la función “auto.arima()” determinó que las importaciones se modelan con:

$$\text{ARIMA } (0,1,3)$$

$$(1 - B) y_t = (1 - 0.8723 \cdot B + 0.2164 \cdot B^2 - 0.2782 \cdot B^3) \epsilon_t \quad (8.4)$$

El modelo está bien especificado. La gráfica de residuos está centrada en cero, el gráfico ACF no muestra autocorrelaciones significativas y el histograma está levemente sesgado hacia la izquierda. Adicionalmente, la prueba de Ljung – Box ( $p = 0.2888$ ) no rechaza la hipótesis nula, por lo que los residuos se consideran ruido blanco.

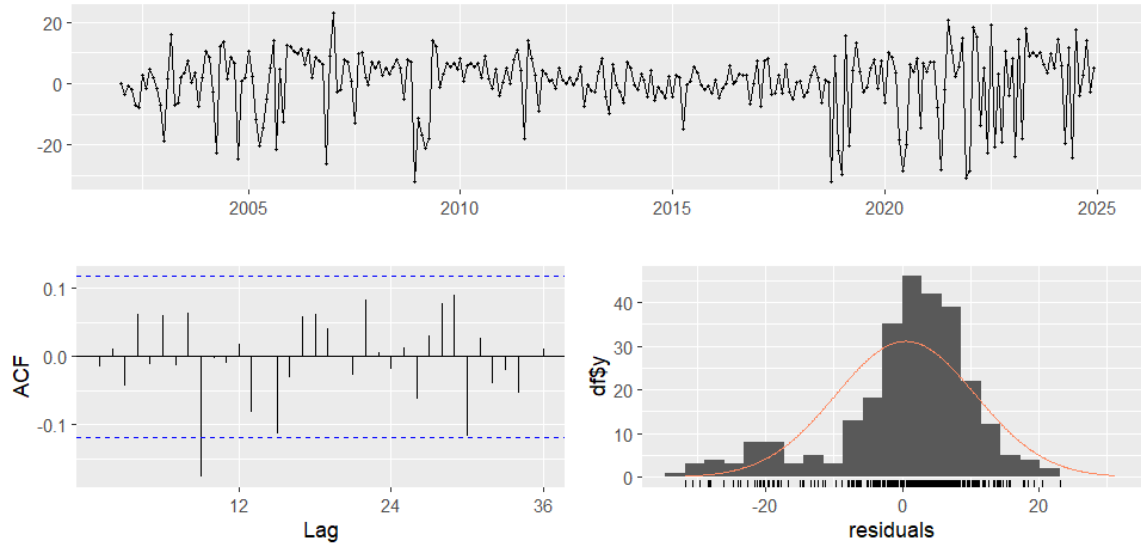


Figura 8.10. Gráfica de residuos (superior), gráfico ACF (inferior izquierdo) e histograma de residuos (inferior derecho) del modelo ARIMA (0,1,3) (elaboración propia)

Los pronósticos son permisivos. Se espera que el 95 % de las importaciones se engloben en el área celeste, mientras que 80 % en el área azul. Los valores esperados por mes se encuentran en la Cuadro 9.25:

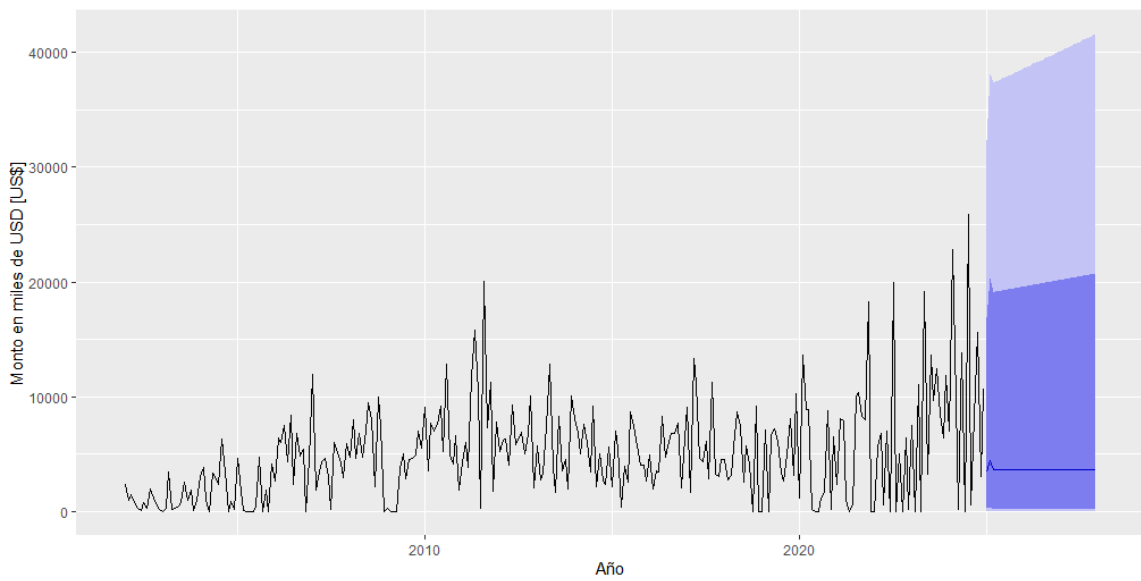


Figura 8.11. Pronósticos de importaciones de hierro (elaboración propia)

Cuadro 8.25. Pronósticos mensual de importación de hierro y acero - intervalos del 80% y 95%

Periodo	Point Forecast	Lo 80	Hi 80	Lo 95	Hi 95
Jan 2025	3428.265	260.0543	16 847.12	21.728 142	32 277.31
Feb 2025	4440.061	402.8446	20 365.57	45.234 631	38 179.12
Mar 2025	3630.959	229.0101	19 079.82	13.579 788	37 319.11
Apr 2025	3630.959	227.3103	19 129.92	13.281 355	37 447.10
May 2025	3630.959	225.6234	19 180.03	12.988 514	37 575.17
Jun 2025	3630.959	223.9492	19 230.14	12.701 174	37 703.34
Jul 2025	3630.959	222.2876	19 280.26	12.419 246	37 831.59
Aug 2025	3630.959	220.6386	19 330.38	12.142 643	37 959.94
Sep 2025	3630.959	219.0020	19 380.51	11.871 278	38 088.38
Oct 2025	3630.959	217.3777	19 430.64	11.605 065	38 216.91
Nov 2025	3630.959	215.7657	19 480.78	11.343 922	38 345.53
Dec 2025	3630.959	214.1657	19 530.92	11.087 765	38 474.24
Jan 2026	3630.959	212.5778	19 581.07	10.836 512	38 603.04
Feb 2026	3630.959	211.0018	19 631.23	10.590 084	38 731.94
Mar 2026	3630.959	209.4376	19 681.39	10.348 402	38 860.92
Apr 2026	3630.959	207.8851	19 731.56	10.111 388	38 990.00
May 2026	3630.959	206.3442	19 781.73	9.878 964	39 119.17
Jun 2026	3630.959	204.8149	19 831.91	9.651 056	39 248.43
Jul 2026	3630.959	203.2969	19 882.10	9.427 589	39 377.78
Aug 2026	3630.959	201.7903	19 932.29	9.208 490	39 507.22
Sep 2026	3630.959	200.2949	19 982.49	8.993 685	39 636.76
Oct 2026	3630.959	198.8106	20 032.70	8.783 105	39 766.38
Nov 2026	3630.959	197.3374	20 082.91	8.576 678	39 896.10
Dec 2026	3630.959	195.8751	20 133.13	8.374 337	40 025.91
Jan 2027	3630.959	194.4237	20 183.35	8.176 011	40 155.82
Feb 2027	3630.959	192.9831	20 233.59	7.981 636	40 285.81
Mar 2027	3630.959	191.5531	20 283.83	7.791 143	40 415.90
Apr 2027	3630.959	190.1337	20 334.07	7.604 469	40 546.08
May 2027	3630.959	188.7249	20 384.33	7.421 549	40 676.35
Jun 2027	3630.959	187.3264	20 434.59	7.242 320	40 806.72
Jul 2027	3630.959	185.9383	20 484.86	7.066 719	40 937.17
Aug 2027	3630.959	184.5604	20 535.13	6.894 685	41 067.72
Sep 2027	3630.959	183.1927	20 585.42	6.726 158	41 198.36
Oct 2027	3630.959	181.8351	20 635.71	6.561 077	41 329.10
Nov 2027	3630.959	180.4875	20 686.01	6.399 385	41 459.92
Dec 2027	3630.959	179.1498	20 736.31	6.241 024	41 590.84

Finalizados los resultados de ambos estudios, se identificaron diferentes características sobre sus técnicas de estimación y limitaciones metodológicas. Comenzando con el modelo de gravitación de comercio, el método de estimación de la pseudo máxima verosimilitud de Poisson (PPML) fue eficiente para estimar el modelo. Entre sus ventajas estuvo utilizar todas las observaciones a pesar de carecer de exportaciones e importaciones, contar con la prueba de enlace de Pregibon como principal criterio de especificación, ser consistente bajo heterocedasticidad al agrupar los errores estándares por país - año y utilizar un método diferente a los mínimos cuadrados ordinarios (OLS) (Shepherd, Doytchinova & Kravchenko, 2019).

Por su parte, el análisis de panel de efectos fijos y el modelo de selección de muestra de Heckman fueron más restrictivos. El análisis de panel transforma las variables dependientes a través del logaritmo lo que excluye las observaciones sin comercio causando un sesgo de selección de muestra. Para verificarlo se necesita el índice inverso de Mills del modelo de Heckman; sin embargo, en esta investigación el modelo estuvo sesgado. Recapitulando, el modelo de Heckman necesita dos ecuaciones para estimar: la ecuación de selección y la ecuación de salida.

La primera requiere un incentivo de comercio. Se utilizó el *costo de entra al mercado* del proyecto *Doing Business* del Banco Mundial según lo especificado por la teoría (Shepherd, Doytchinova & Kravchenko, 2019). No obstante, el indicador estuvo ausente para todo el periodo de la investigación ya que la base de datos utilizada solo cubrió el costo de entrada desde 2005 hasta 2019 y no fue continua para todos los países.

Una forma de verificarlo es comparando las observaciones utilizadas entre el análisis de panel y el modelo de Heckman. Idealmente deberían ser iguales para que el índice inverso de Mills detecte un sesgo de selección en los resultados del análisis de panel. Sumando a lo anterior, la ausencia del incentivo provocó que en el primer filtro del modelo de Heckman (ecuación 6.13) se omitieran algunas observaciones que sí contaban con comercio.

Para resolver el problema se necesita otro indicador. Se recomienda el *índice de conectividad del transporte marítimo de línea* del (LSCI) de *UN Trade and Development* (UNCTAD) que mide la integración de un país a las redes internacionales de transporte marítimo (UNCTADstat Data Centre, 2025). En base a los resultados de la segunda y tercera fase, el *acceso al mar* del país o bloque importador fue significativo para el flujo de las exportaciones e importaciones.

Por su parte, el *costo de entrada al mercado* no afectó los resultados de la primera fase de comercio

bilateral. Existió un registro completo de las exportaciones e importaciones anuales de Guatemala con Estados Unidos, México, Belice, El Salvador y Honduras. Al no omitirse observaciones, se descarta un sesgo de selección, por lo que el modelo de Heckman es innecesario. Para verificarlo se pueden comparar las observaciones entre PPML y el análisis de panel donde se aprecia que son 22.

Por último, ambos métodos de estimación requieren la prueba de RESET de Ramsey para detectar una posible omisión de variables y la prueba de Breusch – Pagan para evaluar la heterocedasticidad en los errores estándar debido a que las dos metodologías estiman la ecuación usando un derivado de OLS. En conjunto provocaron que muchas de las estimaciones fueran descartadas al incumplir una de las pruebas, por lo que la mayor parte del análisis de resultados se hizo en base a los coeficientes de PPML.

Paralelamente, fue beneficioso contar con dos grupos muestrales. El primero corresponde al periodo de 2002 a 2023 y el segundo a intervalos de cuatro años filtrados para el comercio en 2002, 2006, 2010, 2014, 2018 y 2022. La interpretación de los coeficientes se realizó principalmente con el periodo completo debido a la mayor cantidad de observaciones. No obstante, cuando los métodos de estimación fallaban en modelar el comercio, la muestra de intervalos logró que convergieran o fueran significativos.

Como ejemplo se tiene el comercio con los miembros del COMESA y con los miembros del MERCOSUR. En el primero, las exportaciones son estimadas con el periodo completos (Cuadro 8.7), mientras que las importaciones con el periodo filtrado (Cuadro 8.8); en el segundo, ambos son estimados por el grupo muestral de intervalos (Cuadro 8.12). Esto demuestra la necesidad de ajustar las variables a choques comerciales para estabilizar el flujo de las exportaciones e importaciones según lo recomendado por la teoría (Yotov et al., 2016). En este caso, la muestra filtrada ajustó el comercio a la crisis financiera de 2007 – 2008 y a la recesión por la pandemia de COVID – 19.

Sin embargo, el segundo grupo muestral fue problemático para la primera fase. Al contar con seis observaciones algunos métodos de estimación fallaban en calcular el error estándar de sus coeficientes o las pruebas de especificación (Anexo C). Esta limitación fue decisiva para basar el análisis de resultados utilizando el periodo completo.

Continuando con las variables, muchas fueron omitidas. En cada caso se aplicó la prueba VIF para detectar multicolinealidad entre las variables, por esto los regresores son diferentes en cada resultado. De forma general sobre las variables macroeconómicas, la *población del país importador* siempre fue colineal con el PIB; por definición, el PIB engloba a la población.<sup>1</sup> Por su parte, el PIB de Guatemala y el PIB del país o bloque importador<sup>2</sup> aumentaron el comercio según lo esperado por la teoría.

Las variables de gobernanza son contraintuitivas. Se esperaría que un avance en la *estabilidad política, rendición de cuentas, control de corrupción, eficiencia gubernamental, Estado de derecho y calidad regulatoria* de un país incrementa el comercio internacional; sin embargo, se encontró lo opuesto para algunas de estas variables. Durante la primera fase, por ejemplo, la *eficiencia gubernamental* de Guatemala redujo las exportaciones hacia Estados Unidos un 7.43 %, 15.52 % con México, 8.17 % en Belice y 11.53 % con Honduras, mientras que a nivel mundial *la voz y rendición de cuentas* las disminuyó un 3.20 %.

Una explicación puede estar dada por Pushan Dutt y Daniel Traca en su artículo *Corruption and bilateral trade flow: Extortion or evasion?* En él analizan el papel de la corrupción sobre las barreras comerciales, los sobornos solicitados por los burócratas del país exportador pueden clasificarse como extorsión (si cobran para ejercer su oficio) o evasión (si cobran para evadir las barreras arancelarias). Para cuantificarlo usaron un modelo ingenuo que incluye el índice de corrupción del *International Country Risk Guide* (ICRG) que califica de 0 (altamente corrupto) a 100 (nada corrupto) la corrupción de un país. Tras diferentes estimaciones concluyen que la corrupción impide el comercio para

<sup>1</sup>Si se necesita cuantificar el efecto de la *población* debe sustituirse el PIB por el PIB *per capita* en las estimaciones.

<sup>2</sup>Aproximaciones del tamaño del mercado o del tamaño económico (Tinbergen, 1962).

la mayoría de los países (Dutt & Traca, 2010).

Es posible que el comercio de Guatemala siga este patrón. Sin embargo, se necesita de otras pruebas y conocimientos de comercio exterior, que sobrepasan el alcance de una tesis de Licenciatura en Física, para validar la hipótesis. En futuros trabajos se recomienda repetir la metodología de Dutt y Traca para verificar la tendencia del comercio, si se mantiene debe profundizarse en sus causas; si cambia, el problema pudo ser multicolinealidad entre las variables de gobernanza que no fue identificada con la prueba VIF.

Sobre las variables socioculturales, *compartir el idioma español* promovió el comercio, ser una *excolonia* lo disminuyó y España (como *colonizador*) tuvo un impacto minúsculo sobre las exportaciones e importaciones. En cuanto a las variables geográficas, el efecto *del área del país importador* fue insignificante, el *acceso al mar* por parte de los países o bloques incrementaron el comercio y *compartir frontera* con Guatemala lo disminuyó.

Esto no invalida los resultados de McCallum, Anderson o Van Wincoop. Únicamente cuatro países son colindantes con Guatemala (México, Belice, El Salvador y Honduras), en conjunto representan una fracción de las exportaciones e importaciones totales. Al estimar el comercio a nivel mundial, la variable de colindancia captura este patrón y lo estima con signo negativo indicando que mermó el comercio.

Por otra parte, la distancia redujo el flujo de las exportaciones e importaciones validando la teoría al ser una aproximación de los costos de transporte (Tinbergen, 1962). No obstante, algunos resultados omitieron la variable, especialmente en la primera fase. Aquí la distancia es constante para cada par de países, al carecer de variación, los métodos de estimación la excluyen y el efecto de los costos de transporte son absorbidos por las demás covariables.

Por último, la mayoría de los resultados están sesgados conceptualmente. A excepción del modelo estructural de la segunda etapa (Cuadros 8.19 y 8.20 que no superaron las pruebas de especificación), el resto corresponden al modelo de gravitación ingenuo. Recordando la descripción de Head y Mayer, este es útil para fines pedagógicos y carece de resistencia multilaterales (Head & Mayer, 2014). Las resistencias se capturaron utilizando el PIB de Guatemala y el del país o bloque importador; por lo tanto, se incurre en el error de la medalla de oro: una estimación sesgada (World Trade Organization, 2012).

Ligado a lo anterior, la ausencia de resistencias multilaterales provoca el error de la medalla de bronce: un ajuste erróneo de la inflación (World Trade Organization, 2012). Según lo recomendado por la Comisión Económica y Social para Asia y el Pacífico (ESCAP), tanto el flujo comercial como el PIB deben ser nominales y deben existir resistencias multilaterales para ajustar el efecto de la inflación a través de índices de precios no observados. También mencionan que usar el deflactor el Índice del Precio del Consumidor (IPC) o el deflactor del PIB no aproximan las resistencias multilaterales, lo que también provoca sesgos (Shepherd, Doytchinova & Kravchenko, 2019).

Por lo tanto, los resultados de este estudio solo pueden servir como una exploración preliminar del efecto que las variables macroeconómicas, de gobernanza, socioculturales y geográficas tuvieron sobre el comercio internacional guatemalteco durante el periodo de 2002 a 2023.

El segundo estudio sí tiene aplicaciones prácticas para la industria agropecuaria y manufacturera. El café y los artículos de vestuarios se modela con ARIMA (0,1,3) (2,1,0)<sub>12</sub> y ARIMA (0,1,1) (2,0,0)<sub>12</sub>; respectivamente. En ambos casos, los residuos superaron la prueba de Ljung – Box ( $p = 0.2440$  y  $p = 0.3681$ ) lo que sugiere una ausencia de autocorrelación, validando los modelos. La estacionalidad únicamente se identificó visualmente para las exportaciones de café (Figura 8.3), pero ambos tienen el mismo compartimiento a largo plazo (Figuras 8.3 y 8.8).

A partir de 2027 la incertidumbre de las exportaciones crece y los intervalos al 95 % se ensanchan sobrepasando la tendencia que cada bien tuvo durante el periodo de 2002 a 2024. Este comparti-

miento también lo observó Mohammad Momani y su equipo en *Comparative Analysis of ARIMA and SARIMA Models in Electrical Load Forecasting: Insights for Long and Short-Term Projection*, donde concluyen que los modelos ARIMA son eficiente para la pronosticación a largo plazo mientras que SARIMA es útil a corto plazo o cuando se tiene un patrón de estacional definido como es el caso de las exportaciones de café de la Figura 8.1 (Momani et al., 2025).

Adicionalmente es necesario mencionar que en un inicio se planeó pronosticar la importación de vehículos y material de transporte de la industria manufacturera. Este es el bien predominantes del comercio bilateral con Japón; sin embargo, se identificó una posible autocorrelación en sus residuos durante la prueba de Ljung – Box ( $p = 0.0416$ ) para su modelo ARIMA (0,1,1) (2,0,0) 12. Al ser inservible para las estimaciones, se seleccionó el bien predominante en esta industria para Guatemala: los artículos de vestuario.

Por último, los pronósticos de la importación de hierro y acero de la industria extractiva no son representativos. A pesar de que el modelo ARIMA (0, 1, 3) superar la prueba de Ljung – Box ( $p = 0.2888$ ), los pronósticos son idénticos a partir de marzo de 2025 hasta diciembre de 2027 (Cuadro 8.25). Esto se debe a que la serie de tiempo no sigue una tendencia aparente como el resto de los resultados (Figura 8.9). Cabe mencionar que fue imposible utilizar otro bien de la industria extractiva ya que el resto de los descritos en la sección 6.2.1 tienen un registro incompleto de sus importaciones (Anexo D).

Si se desea pronosticar el hierro y acero se necesitan otros métodos de estimación. El principal candidato es la autorregresión de redes neuronales ya que permite modelar relaciones no lineales complejas entre las variables dependientes y sus predictores y no requiere que la serie de tiempo sea estacional para generar los pronósticos (Hyndman & Athanasopoulos, 2021). A pesar de sus beneficios, la metodología sobrepasa el alcance de esta investigación. Los métodos autorregresivos ARIMA y SARIMA son una conexión a la historia de la econofísica a través del *random walk* de Louis Bachelier, si bien no son la misma formulación, ARIMA (0,1,0) pueden reducirse a esta (Hyndman & Athanasopoulos, 2021).

En síntesis, únicamente los pronósticos para las exportaciones de café y los artículos de vestuario son útiles en el periodo de 2025 a 2027 (Cuadros 8.23 y 8.24). Para mejorar su alcance se necesita una actualización constante de las exportaciones mensuales o utilizar otros métodos de estimación.

1. El modelo de gravitación de comercio ingenuo evaluó el efecto preliminar que variables macroeconómicas, de gobernanza, socioculturales y geográficas tuvieron sobre las exportaciones e importaciones de Guatemala con sus países vecinos, principales bloques comerciales y a nivel mundial en el periodo de 2002 a 2023.
2. El método de estimación de la pseudo máxima verosimilitud de Poisson (PPML) fue eficiente para evaluar el modelo de gravitación de comercio. En comparación con el análisis de panel de efectos fijos y el método de selección de muestra de Heckman, PPML carece de un sesgo de selección de muestra y es robusto bajo heterocedasticidad.
3. Manteniendo todo lo demás constantes, *ceteris paribus*, el comercio internacional de Guatemala durante el periodo de 2002 a 2023 fue proporcional al producto interno bruto guatemalteco y el del país o bloque importador e inversamente proporcional a la distancia geodésica entre ambos. Esto es un análogo a la Ley de gravitación universal de Newton.
4. Las variables de gobernanza, como la *voz y rendición de cuentas*, *el control de corrupción o el Estado de derecho*, redujeron el comercio internacional de Guatemala. Socioculturalmente, compartir el mismo idioma aumentó el flujo de las exportaciones e importaciones, mientras que ser una excolonia española lo disminuyó. Para las variables geográficas, el acceso al mar de los importadores acrecentó el comercio, mientras que ser colindante con Guatemala lo redujo.
5. El pronóstico de la exportación de café guatemalteco hacia Japón para el periodo de 2025 a 2027 corresponde al método autorregresivo ARIMA (0,1,3) (2,1,0)<sup>12</sup>, la exportación de artículos vestuario se describe por ARIMA (0,1,1) (2,0,0)<sup>12</sup>.

1. Para cuantificar el efecto de los principales bloques comerciales a nivel continental se necesita las resistencias multilaterales del modelo de gravitación de comercio estructural. Se debe recabar un registro de comercio y de PIB por país superior al periodo de 2002 a 2023. De esta forma, habrá más registros ajustados a shock comerciales que darán mejores resultados en las estimaciones.
2. Se necesita un incentivo de comercio diferente al costo de entrada al mercado del proyecto Doing Business para efectuar el método de selección de muestra de Heckman. Se recomienda el *índice de conectividad del transporte marítimo de línea* del (LSCI) del *UN Trade and Development* (UNCTAD)
3. Para determinar la causa por la cual las variables de gobernanza reducen el comercio internacional de Guatemala se recomienda utilizar como aproximación el *índice de corrupción* del *Internacional Country Risk Guide* (ICRG). Si el comercio cambia de comportamiento, significa que las variables de gobernanza usadas en esta investigación presentan multicolinealidad que no fue detectada por la prueba VIF.
4. Se recomienda utilizar otros métodos autorregresivos para pronosticar el comercio bilateral de Guatemala con Japón, el principal candidato es el modelo de redes neuronales que permite modelar relaciones no lineales complejas entre las variables dependientes y sus predictores.

- Aitken, N. (1973). The Effect of the EEC and EFTA on European Trade: A Temporal Cross-Section Analysis. *The American Economic Review*, 63(5), 881-892. <https://www.jstor.org/stable/1813911?origin=JSTOR-pdf>
- Anderson, J. (1979). A Theoretical Foundation for the Gravity Equation. *The American Economic Review*, 69(1), 106-116. <http://www.jstor.org/stable/1802501>
- Anderson, J., & Van Wincoop, E. (2003). Gravity with Gravitas: A Solution to the Border Puzzle. *The American Economic Review*, 93(1), 170-192. <https://www.jstor.org/stable/3132167>
- ASEAN Secretariat. (2025). *ASEAN Plus Three Economic Relation*. Association of Southeast Asian Nations. <https://asean.org/our-communities/economic-community/integration-with-global-economy/asean-plus-three-economic-relation/>
- Australia-New Zealand closer economic relations Trade agreement. (s. f.). *Australian Government Department Of Foreign Affairs And Trade*. <https://www.dfat.gov.au/trade/agreements/in-force/anzcerta/australia-new-zealand-closer-economic-relations-trade-agreement>
- Banco de Guatemala (Banguat). (s. f.). *Comercio Exterior de Guatemala*. <https://banguat.gob.gt/sites/default/files/banguat/estaeco/comercio/default.asp?kactual=2>
- BBVA CIB. (2025, 9 mayo). *Bloques económicos: definición, objetivos y ejemplos*. <https://www.bbvacib.com/es/insights/news/https-www-bbvacib-com-es-insights-news-bloques-economicos-comerciales-que-son/>
- Benelux. (2023, 3 febrero). *Histoire du Benelux*. <https://www.benelux.int/fr/info-citoyen/union-benelux/a-propos-de-nous/histoire/>
- Bergstrand, J. H. (1985). The Gravity Equation in International Trade: Some Microeconomic Foundations and Empirical Evidence. *The Review Of Economics And Statistics*, 67(3), 474.

<https://doi.org/10.2307/1925976>

- Bhattacharya, D. (2006). The Celestial Mechanics of Newton. *Resonance Journal Of Science Education*, 11(12). <https://www.ias.ac.in/article/fulltext/reso/011/12/0035-0044>
- Bobbitt, Z. (2020, 15 octubre). *Ljung-Box Test: Definition + example*. *Statology*. <https://www.statology.org/ljung-box-test/>
- Boys, C. V. (1890). I. On the Cavendish experiment. *Proceedings Of The Royal Society Of London*, 46(280-285), 253-268. <https://doi.org/10.1098/rspl.1889.0032>
- Boys, C. V. (1894). I. On the Newtonian constant of gravitation. *Proceedings Of The Royal Society Of London*, 56(336-339), 131-132. <https://doi.org/10.1098/rspl.1894.0089>
- Bytheway, S. (2022). The Japanese economy since World War II. *Oxford Research Encyclopedia Of Asian History*. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190277727.013.688>
- Canada. (2016, 30 noviembre). *North American Free Trade Agreement – Objectives*. GAC. <https://www.international.gc.ca/trade-commerce/trade-agreements-accords-commerciaux/agr-acc/nafta-alena/fta-ale/01.aspx?lang=eng>
- Castillo, C. F. (2023). *Pronóstico de importación de vehículos usados y venta de vehículos nuevos en Guatemala* [Tesis de maestría, Universidad de San Carlos de Guatemala]. <http://www.repositorio.usac.edu.gt/20344/>
- Cavendish, H. (1798). XXI. Experiments to determine the density of the earth. *Philosophical Transactions Of The Royal Society Of London*, 88, 469-526. <https://doi.org/10.1098/rstl.1798.0022>
- Chang, V. (2007, 31 octubre). *Weighing the Earth in 1798: The Cavendish Experiment*. <http://large.stanford.edu/courses/2007/ph210/chang1/#:~:text=To%20determine%20the%20angular%20displacement,to%20the%20opposite%20extreme%20position.>
- Common Market for Eastern and Southern Africa. (2024, 19 enero). *What is COMESA*. <https://www.comesa.int/what-is-comesa/>
- Commonwealth Secretariat. (s. f.). *Our work*. <https://thecommonwealth.org/our-work>
- Domínguez Pérez, J. M. (2020). *Modelos de fluctuaciones de precios de activos* [Tesis de pregrado, Universidad del Valle de Guatemala]. <http://repositorio.uvg.edu.gt/xmlui/123456789/3892>
- Dutt, P., & Traca, D. (2010). Corruption and bilateral trade flows: Extortion or evasion? *The Review of Economics and Statistics*, 92(4), 843–860. <http://www.jstor.org/stable/40985798>
- Earle, M. A. (2006). Sphere to Spheroid Comparisons. *Journal Of Navigation*, 59(3), 491-496. <https://doi.org/10.1017/s0373463306003845>
- ESIC Business & Marketing School. (s. f.). *Integración económica: qué es, tipos y procesos*. <https://www.esic.edu/rethink/business/integracion-economica-c>

- Espasa, A. (1991). Perspectiva histórica de los modelos ARIMA y su utilidad en el análisis económico. *Revista de Historia Económica / Journal Of Iberian And Latin American Economic History*, 9(3), 541-549. <https://doi.org/10.1017/s0212610900003062>
- European Union. (s. f.). *Hechos y cifras clave / Unión Europea*. [https://european-union.europa.eu/principles-countries-history/facts-and-figures-european-union\\_es](https://european-union.europa.eu/principles-countries-history/facts-and-figures-european-union_es)
- Floyd, D. (2025, 27 enero). *How Did NAFTA Affect the Economies of Participating Countries?* Investopedia. <https://www.investopedia.com/articles/economics/08/north-american-free-trade-agreement.asp#citation-68>
- Fuentes, G. A. (2025). *Patrones, determinantes y potencial del comercio internacional de Guatemala: un modelo gravitacional* [Tesis de pregrado, Universidad Rafael Landívar]. En BibliotecaURL. <https://biblioteca.url.edu.gt/autores/fuentes-sandoval-gabriel-alejandro/>
- Gossett, D. R. (2023). Agriculture industry. EBSCO Research Starters. <https://www.ebsco.com/research-starters/agriculture-and-agribusiness/agriculture-industry>
- Head, K., & Mayer, T. (2014). Gravity Equations: Workhorse, Toolkit, and Cookbook. *Handbook of international economics*, 4, 131-195. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-54314-1.00003-3>
- Hutton, C. (1778). XXXIII. An account of the calculations made from the survey and measures taken at Schehallien, in order to ascertain the mean density of the Earth. *Philosophical Transactions Of The Royal Society Of London*, 68, 689-788. <https://doi.org/10.1098/rstl.1778.0034>
- Hyndman, R.J., & Athanasopoulos, G. (2021) *Forecasting: principles and practice*, 3rd edition, *OTexts: Melbourne, Australia*. <https://otexts.com/fpp3/index.html>
- American Physical Society. (2008). *June 1798: Cavendish weighs the world*. <https://www.aps.org/apsnews/2008/06/1798-cavendish-weighs-world>
- Lacaze, M. V. (2023). Los fundamentos conceptuales del modelo gravitacional de comercio: Una revisión de la literatura. *Estudios Económicos*, XL(80). <https://revistas.uns.edu.ar/ee/article/view/3267/2121>
- Libretexts. (2024). 10.4: Tests of General Relativity. *Physics LibreTexts*. [https://phys.libretexts.org/Courses/Chicago\\_State\\_University/PH\\_S\\_1150%3A\\_Basic\\_Astronomy/10%3A\\_A\\_General\\_Relativity/10.04%3A\\_Tests\\_of\\_General\\_Relativity](https://phys.libretexts.org/Courses/Chicago_State_University/PH_S_1150%3A_Basic_Astronomy/10%3A_A_General_Relativity/10.04%3A_Tests_of_General_Relativity)
- UNCTADstat Data Centre. (2025). *Liner shipping connectivity index, quarterly (analytical)*. <https://unctadstat.unctad.org/datacentre/reportInfo/US.LSCI>
- Linnemann, H. (1967). An Econometric Study of International Trade Flows. *The Economic Journal*, 77(306), 366. <https://doi.org/10.2307/2229319>
- Mankiw, N. G. (2012). *Principios de economía* (6ª ed.). Cengage Learning Editores.
- McCallum, J. (1995). National Borders Matter: Canada-U.S. Regional Trade Patterns. *The Ame-*

- ican Economic Review*, 85(3), 615-623. <https://www.jstor.org/stable/2118191?origin=JSTOR-pdf>
- Mendoza, M. (2018). *Evaluación del impacto del Tratado de Libre Comercio (DR-CAFTA) sobre el flujo comercial de Guatemala*. <https://bdigital.zamorano.edu/handle/11036/6281>
- MERCOSUR. (2024). *En pocas palabras*. <https://www.mercosur.int/quienes-somos/en-pocas-palabras/>
- Mills, V. (2022). *A song of Schiehallion*. The Royal Society Blog. <https://royalsociety.org/blog/2022/08/song-of-schiehallion/>
- Ministerio de Economía (MINECO). (s. f.). *Tratados vigentes acuerdos de alcance parcial Guatemala-Belice*. <https://www.mineco.gob.gt/tratados-vigentes-acuerdos-de-alcance-parcial-guatemala-belice>
- Ministerio de Economía (MINECO). (s.f.). *Tratados vigentes Libre comercio México*. <https://www.mineco.gob.gt/tratados-vigentes-libre-comercio-mexico>
- Mohr, P. J., Newell, D. B., & Taylor, B. N. (2016). CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2014. *Reviews Of Modern Physics*, 88(3). <https://doi.org/10.1103/revmodphys.88.035009>
- Momani, M. A., Abwaini, R. K., Ababneh, B. M., & Nasser, M. A. (2025). Comparative Analysis of ARIMA and SARIMA Models in Electrical Load Forecasting: Insights for Long and Short-Term Projections. *International Journal Of Electrical Engineering And Computer Science*, 7, 83-89. <https://doi.org/10.37394/232027.2025.7.8>
- NASA. (s. f.). Earth Fact Sheet. *NASA Space Science Data Coordinated Archive (NSSDC)*. <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html>
- National Centers for Environmental Information (NCEI). (2025). *On This Day: 2011 Tohoku Earthquake and Tsunami*. <https://www.ncei.noaa.gov/news/day-2011-japan-earthquake-and-tsunami>
- Newton, I. (1846). *The Mathematical Principles of Natural Philosophy* (N. W. Chittenden, Ed.; A. Motte, Trad.; 1.a ed.) [PDF]. <https://web.math.princeton.edu/~eprywes/F22FRS/newtonprincipia.pdf>
- Obstfeld, M., & Krugman, P. R. (2012). *Economía internacional: Teoría y política*. (7.a ed.). Pearson Educación eBooks. <https://fad.unsa.edu.pe/bancayseguros/wp-content/uploads/sites/4/2019/03/Krugman-y-Obstfeld-2006-Economia-Internacional.pdf>
- Office of the Historian (s. f.). *Nixon and the End of the Bretton Woods System, 1971 – 1973*. <https://history.state.gov/milestones/1969-1976/nixon-shock>
- Office of the U.S. Trade Representative. (s. f.) *United States-Mexico-Canada Agreement*. <https://ustr.gov/trade-agreements/free-trade-agreements/united-states-mexico-canada-agreement>
- Portal SAT. (2025). *Portal SAT | Acuerdos y Tratados Internacionales - Guatemala*. <https://portal.sat.gob.gt/portal/acuerdos-y-tratados-internacionales/#171562102817>

8-71572455-cba0

- Pregibon, D. (1980). Goodness of Link Tests for Generalized Linear Models. *Journal of The Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, 29(1), 15. <https://doi.org/10.2307/2346405>
- Ramsey, J. B. (1969). Tests for Specification Errors in Classical Linear Least-Squares Regression Analysis. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 31(2), 350–371. <http://www.jstor.org/stable/2984219>
- Ravenstein, E. G. (1885). The Laws of Migration. *Journal Of The Statistical Society Of London*, 48(2), 167. <https://doi.org/10.2307/2979181>
- Richmond, P., Mimkes, J., & Hutzler, S. (2013). *Econophysics and Physical Economics*. Oxford University Press eBooks. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199674701.001.0001>
- Sadiku, M. N. O. (2018). *Elements of Electromagnetic* (7.a ed.). Oxford University Press.
- Schmidheiny, K. (2024, 24 noviembre). Panel Data: Fixed and Random Effects. <https://www.schmidheiny.name/teaching/panel2up.pdf>
- Shepherd, B., Doytchinova, H. S. & Kravchenko, A. (2019). The gravity model of international trade: a user guide [R version]. Bangkok: United Nations ESCAP. Available at: <https://www.unescap.org/resources/gravity-model-international-trade-user-guide-r-version>
- Silva, J. M. C. S., & Tenreyro, S. (2006). The Log of Gravity. *The Review Of Economics And Statistics*, 88(4), 641-658. <https://doi.org/10.1162/rest.88.4.641>
- Sinha, S., Chatterjee, A., Chakraborti, A., & Chakrabarti, B. (2010). *Econophysics: An Introduction*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. <https://www.wiley.com/en-us/Econophysics%3A+An+Introduction-p-9783527408153>
- The Editors of Encyclopaedia Britannica. (1998a). *French Community | European Union, Integration, Sovereignty*. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/topic/French-Community>
- The Editors of Encyclopaedia Britannica. (1998b). *Grain | Metric, Imperial & Avoirdupois*. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/science/grain-unit-of-weight>
- The Editors of Encyclopaedia Britannica. (2025a). *Honduras | Map, Population, History, Geography, & Culture*. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/place/Honduras>
- The Editors of Encyclopaedia Britannica. (2025b). *Mexico | History, Map, flag, population, & Facts*. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/place/Mexico>
- The Editors of Encyclopaedia Britannica. (2025c). *United States | History, map, flag, & population*. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/place/United-States>

- The Editors of Encyclopaedia Britannica. (2025d). *Belize | History, Capital, Language, Map, Flag, & Facts*. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/place/Belize>
- The Editors of Encyclopaedia Britannica. (2025e). *El Salvador | History, flag, Map, Population, capital, religion, & Facts*. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/place/El-Salvador/Labor-and-taxation>
- Theilmann, J. M. (2024). *Strip and surface mining*. EBSCO Research Starters. <https://www.ebsco.com/research-starters/mining-and-mineral-resources/strip-and-surface-mining>
- Thornton, S. T., & Marion, J. B. (2004). *Classical Dynamics of Particles and Systems*. Brooks/Cole Publishing Company.
- Timbergen, J. (1962). *SHAPING THE WORLD ECONOMY: Suggestions for an International Economic Policy (3.a ed.)*. THE TWENTIETH CENTURY FUND. [https://archive.org/details/shapingworldecon000unse\\_h8g8/page/n7/mode/2up](https://archive.org/details/shapingworldecon000unse_h8g8/page/n7/mode/2up)
- Tolish, A. (2010). *General Relativity and the newtonian limit*. <https://www.math.uchicago.edu/~may/VIGRE/VIGRE2010/REUPapers/Tolish.pdf>
- U.S. Customs and Border Protection. (2023). *Central America-Dominican Republic Free Trade Agreement (CAFTA-DR)*. <https://www.cbp.gov/trade/free-trade-agreements/cafta-dr>
- Van Bergeijk, P. A. G., Bergstrand, J. H., Anderson, J. E., Baier, S. L., Bikker, J. A., Head, K., Bosker, E. M., Möhlmann, L. J., Rose, A. K., Afman, E. R., Brakman, S., & Boulhol, H. (2010). *The Gravity Model in International Trade*. Cambridge University Press eBooks. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511762109>
- World Bank. (s. f.). *World Bank Open Data: NY.GDP.MKTP.KD.ZG (Japan)*. <https://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.MKTP.KD.ZG?locations=JP>
- World Trade Organization. (2012). Analyzing bilateral trade using the gravity equation. *A Practical Guide to Trade Policy Analysis, 101-136*. <https://doi.org/10.30875/5bfd1a0b-en>
- Yotov, Y. V., Piermartini, R., Monteiro, J., & Larch, M. (2016). An Advanced Guide to Trade Policy Analysis: The Structural Gravity Model. *World Trade Organization and United Nations*. <https://doi.org/10.30875/abc0167e-en>
- Zamora González, J. J. (2023). *Pronóstico del monto en dólares de la exportación de banano en Guatemala para el año 2024 a través del modelo con mayor grado de confiabilidad entre la metodología de ARIMA y Holt-Winters* [Tesis de maestría, Universidad de San Carlos de Guatemala]. <http://www.repositorio.usac.edu.gt/20247/>
- Zimmer, S. (2022). *Manufacturing*. <https://www.ebsco.com/research-starters/business-and-management/manufacturing>

---

## Desarrollo de la geodésica de una esfera

---

Los pasos generales de la deducción se obtuvieron del libro *Classical Dynamics of Particle and Systems* (Thornton & Marion, 2004, p. 217).

### A.1. Planteamiento del problema

Encontrar la expresión para la distancia más corta entre dos puntos,  $A$  y  $B$ , en la superficie de una esfera.

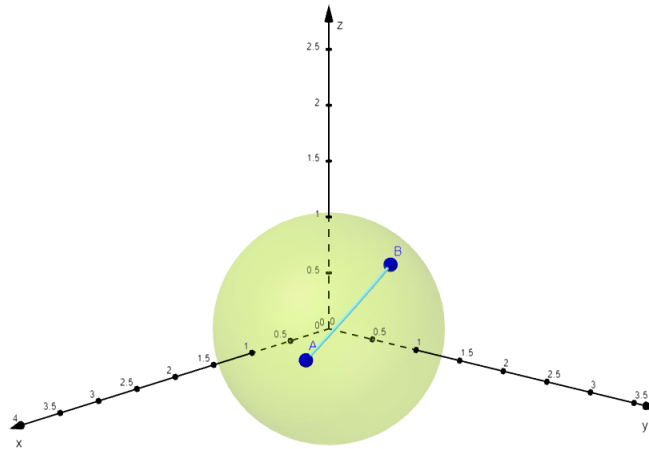


Figura A.1. Puntos en la superficie de una esfera (elaboración propia)

### A.1.1. Coordenadas esféricas

$$x = \rho \cos \theta \sin \phi \quad (\text{A.1})$$

$$y = \rho \sin \theta \sin \phi \quad (\text{A.2})$$

$$z = \rho \cos \phi \quad (\text{A.3})$$

## A.2. Cálculo del diferencial de longitud de arco

### A.2.1. Diferenciales $dx$ , $dy$ y $dz$

$$dx = \frac{\partial x}{\partial \theta} d\theta + \frac{\partial x}{\partial \phi} d\phi = \frac{\partial (\rho \cos \theta \sin \phi)}{\partial \theta} d\theta + \frac{\partial (\rho \cos \theta \sin \phi)}{\partial \phi} d\phi = -\rho \sin \theta \sin \phi d\theta + \rho \cos \theta \cos \phi d\phi \quad (\text{A.4})$$

$$dy = \frac{\partial y}{\partial \theta} d\theta + \frac{\partial y}{\partial \phi} d\phi = \frac{\partial (\rho \sin \theta \sin \phi)}{\partial \theta} d\theta + \frac{\partial (\rho \sin \theta \sin \phi)}{\partial \phi} d\phi = \rho \cos \theta \sin \phi d\theta + \rho \sin \theta \cos \phi d\phi \quad (\text{A.5})$$

$$dz = \frac{\partial z}{\partial \theta} d\theta + \frac{\partial z}{\partial \phi} d\phi = \frac{\partial (\rho \cos \phi)}{\partial \theta} d\theta + \frac{\partial (\rho \cos \phi)}{\partial \phi} d\phi = -\rho \sin \phi d\phi \quad (\text{A.6})$$

### A.2.2. Sustitución en la fórmula general de longitud de arco

$$\begin{aligned} dS &= \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2} \\ &= \sqrt{(-\rho \sin \theta \sin \phi d\theta + \rho \cos \theta \cos \phi d\phi)^2 + (\rho \cos \theta \sin \phi d\theta + \rho \sin \theta \cos \phi d\phi)^2 + (-\rho \sin \phi d\phi)^2} \\ &= [\rho^2 \sin^2 \theta \sin^2 \phi d\theta^2 - 2\rho^2 \sin \theta \cos \theta \sin \phi \cos \phi d\theta d\phi + \rho^2 \cos^2 \theta \cos^2 \phi d\phi^2 \\ &\quad + \rho^2 \cos^2 \theta \sin^2 \phi d\theta^2 + 2\rho^2 \sin \theta \cos \theta \sin \phi \cos \phi d\theta d\phi + \rho^2 \sin^2 \theta \cos^2 \phi d\phi^2 \\ &\quad + \rho^2 \sin^2 \phi d\phi^2]^{1/2} \\ &= \sqrt{\rho^2 \sin^2 \phi d\theta^2 (\sin^2 \theta + \cos^2 \theta) + \rho^2 \cos^2 \phi d\phi^2 (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta) + \rho^2 \sin^2 \phi d\phi^2} \\ &= \sqrt{\rho^2 \sin^2 \phi d\theta^2 + \rho^2 \cos^2 \phi d\phi^2 + \rho^2 \sin^2 \phi d\phi^2} \\ &= \sqrt{\rho^2 [\sin^2 \phi d\theta^2 + (\cos^2 \phi + \sin^2 \phi) d\phi^2]} \\ &= \rho \sqrt{\sin^2 \phi d\theta^2 + d\phi^2} \\ &= \rho \sqrt{\left( \sin^2 \phi + \frac{d\phi^2}{d\theta^2} \right) d\theta^2} \\ &= \rho d\theta \sqrt{\sin^2 \phi + \left( \frac{d\phi}{d\theta} \right)^2} \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

### A.3. Planteamiento de la longitud de arco

$$L = \int_A^B ds = \int_{\phi_A}^{\phi_B} \rho d\theta \sqrt{\sin^2 \phi^2 + \left(\frac{d\phi}{d\theta}\right)^2} \quad (\text{A.8})$$

### A.4. Optimización a través del cálculo de variaciones

#### A.4.1. Aplicación de la ecuación de Euler–Lagrange

$$L = \int_{\phi_A}^{\phi_B} \rho d\theta \sqrt{\sin^2 \phi^2 + \left(\frac{d\phi}{d\theta}\right)^2} \quad (\text{A.9})$$

Sean:

$$\phi' = \frac{d\phi}{d\theta}, \quad F(\phi, \theta, \theta') = \sqrt{\sin^2 \phi + \theta'^2}$$

La segunda forma de la ecuación de Euler–Lagrange:

$$f - y' \frac{df}{dy} = \text{constante} = k \quad (\text{A.10})$$

$$\begin{aligned} f - y' \frac{df}{dy} &= \sqrt{\sin^2 \phi^2 + \phi'^2} - \phi' \frac{\partial \left( \sqrt{\sin^2 \phi^2 + \phi'^2} \right)}{\partial \phi'} = \sqrt{\sin^2 \phi^2 + \phi'^2} - \phi' \frac{\left( \sin^2 \phi^2 + \phi'^2 \right)^{\frac{1}{2}}}{\partial \phi'} \\ &= \sqrt{\sin^2 \phi^2 + \phi'^2} - \phi' \frac{1}{2} \left( \sin^2 \phi^2 + \phi'^2 \right)^{-\frac{1}{2}} \left( 2\phi' \right) = \sqrt{\sin^2 \phi^2 + \phi'^2} - \frac{2\phi'^2}{2\sqrt{\sin^2 \phi^2 + \phi'^2}} \\ &= \sqrt{\sin^2 \phi^2 + \phi'^2} - \frac{\phi'^2}{\sqrt{\sin^2 \phi^2 + \phi'^2}} = k \end{aligned} \quad (\text{A.11})$$

Despejando  $\phi'$

$$\begin{aligned}
 \sqrt{\sin^2 \phi + \phi'^2} - \frac{\phi'^2}{\sqrt{\sin^2 \phi + \phi'^2}} &= k \\
 \left( \sqrt{\sin^2 \phi + \phi'^2} - \frac{\phi'^2}{\sqrt{\sin^2 \phi + \phi'^2}} \right) \sqrt{\sin^2 \phi + \phi'^2} &= k \sqrt{\sin^2 \phi + \phi'^2} \\
 \sin^2 \phi + \phi'^2 - \phi'^2 &= k \sqrt{\sin^2 \phi + \phi'^2} \\
 \sin^2 \phi &= k \sqrt{\sin^2 \phi + \phi'^2} \\
 \sin^2 \phi &= k^2 (\sin^2 \phi + \phi'^2) \\
 \sin^2 \phi - k^2 \sin^2 \phi &= k^2 \phi'^2 \\
 \frac{\sin^2 \phi (\sin^2 \phi - k^2)}{k^2} &= \phi'^2 \\
 \Rightarrow \phi' &= \frac{\sin \phi \sqrt{\sin^2 \phi - k^2}}{k}
 \end{aligned} \tag{A.12}$$

Por lo tanto:

$$\frac{d\phi}{d\theta} = \frac{\sin \phi \sqrt{\sin^2 \phi - k^2}}{k} \tag{A.13}$$

## A.5. Solución de la derivada

Despeje de  $d\theta$ :

$$\begin{aligned}
 \frac{d\phi}{d\theta} &= \frac{\sin \phi \sqrt{\sin^2 \phi - k^2}}{k} \\
 \left( \frac{d\phi}{d\theta} \right)^{-1} &= \left( \frac{\sin \phi \sqrt{\sin^2 \phi - k^2}}{k} \right)^{-1} \\
 \frac{d\theta}{d\phi} &= \frac{k}{\sin \phi \sqrt{\sin^2 \phi - k^2}} \\
 \Rightarrow d\theta &= \frac{k}{\sin \phi \sqrt{\sin^2 \phi - k^2}} d\phi
 \end{aligned} \tag{A.14}$$

**Sustitución trigonométrica**

Sea un triángulo rectángulo con ángulo interior  $\phi$ , cateto opuesto “k” y adyacente “u”:

$$\sin \phi = \frac{k}{\sqrt{k^2 + u^2}}, \quad \cos \phi = \frac{u}{\sqrt{k^2 + u^2}}$$

### A.5.1. Integración

$$\int d\theta = \int \frac{k}{\sin \phi \sqrt{\sin^2 \phi - k^2}} d\phi \quad (\text{A.15})$$

Sustituyendo:

$$\begin{aligned} u &= k \cot \phi \rightarrow du = -k \csc^2 \phi d\phi \\ \sin \phi &= \frac{k}{\sqrt{u^2 + k^2}}; \sin^2 \phi = \frac{k^2}{u^2 + k^2} \\ \theta &= \int \frac{k}{\sin \phi \sqrt{\sin^2 \phi - k^2}} \left( -\frac{du \sin^2 \phi}{k} \right) = - \int \frac{\sin \phi du}{\sqrt{\sin^2 \phi - k^2}} \\ &= - \int \frac{\frac{k}{\sqrt{u^2 + k^2}}}{\sqrt{\frac{k^2}{u^2 + k^2} - k^2}} du = - \int \frac{\frac{k}{\sqrt{u^2 + k^2}}}{\sqrt{k^2 \left( \frac{1}{u^2 + k^2} - 1 \right)}} du \\ &= - \int \frac{\frac{k}{\sqrt{u^2 + k^2}}}{k \sqrt{\frac{1 - (u^2 + k^2)}{u^2 + k^2}}} du = - \int \frac{\frac{k}{\sqrt{u^2 + k^2}}}{k \sqrt{\frac{1 - (u^2 + k^2)}{u^2 + k^2}}} du \\ &= - \int \frac{k \sqrt{u^2 + k^2}}{k \sqrt{u^2 + k^2} \sqrt{1 - u^2 - k^2}} du = - \int \frac{du}{\sqrt{1 - u^2 - k^2}}; \text{ sea } \alpha^2 = 1 - k^2: \\ &= - \int \frac{du}{\sqrt{\alpha^2 - u^2}} = - \int \frac{du}{\sqrt{\alpha^2 \left( 1 - \frac{u^2}{\alpha^2} \right)}} \\ &= - \int \frac{du}{\alpha \sqrt{1 - \frac{u^2}{\alpha^2}}} = - \frac{1}{\alpha} \int \frac{du}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{\alpha^2}}} \end{aligned} \quad (\text{A.16})$$

sustituyendo  $\frac{u}{\alpha} = \sin w$  y  $\frac{du}{\alpha} = \cos w dw$ :

$$\begin{aligned} &= - \frac{1}{\alpha} \int \frac{\alpha \cos w}{\sqrt{1 - \sin^2 w}} dw = - \frac{\alpha}{\alpha} \int \frac{\cos w}{\sqrt{1 - \sin^2 w}} dw \\ &= - \int \frac{\cos w}{\sqrt{\cos^2 w}} dw = - \int \frac{\cos w}{\cos w} dw \\ &= - \int 1 dw = -w + C \end{aligned}$$

Reescribiendo w:

$$\begin{aligned} &= - \arcsin \left( \frac{u}{\alpha} \right) + C \\ &= - \arcsin \left( \frac{k \cot \phi}{\sqrt{1 - k^2}} \right) + C \end{aligned}$$

Por lo tanto:

$$\theta = - \arcsin \left( \frac{k \cot \phi}{\sqrt{1 - k^2}} \right) + \theta_0 \quad (\text{A.17})$$

## A.6. Deducción de la ecuación del círculo máximo

$$\begin{aligned}
\theta &= -\arcsin\left(\frac{k \cot \phi}{\sqrt{1-k^2}}\right) + \theta_0 \\
\theta - \theta_0 &= -\arcsin\left(\frac{k \cot \phi}{\sqrt{1-k^2}}\right) \\
\theta_0 - \theta &= \arcsin\left(\frac{k \cot \phi}{\sqrt{1-k^2}}\right); \text{ Sea } \beta = \frac{k}{\sqrt{1-k^2}} \\
\sin(\theta_0 - \theta) &= \beta \cot \phi \\
\sin \theta_0 \cos \theta - \cos \theta_0 \sin \theta &= \beta \cot \phi \\
\sin \theta_0 \cos \theta - \cos \theta_0 \sin \theta &= \beta \frac{\cos \phi}{\sin \phi} \\
\sin \phi (\sin \theta_0 \cos \theta - \cos \theta_0 \sin \theta) &= \left(\beta \frac{\cos \phi}{\sin \phi}\right) \sin \phi \\
\sin \theta_0 \cos \theta \sin \phi - \cos \theta_0 \sin \theta \sin \phi &= \beta \cos \phi \\
\rho (\sin \theta_0 \cos \theta \sin \phi - \cos \theta_0 \sin \theta \sin \phi) &= \beta \cos \phi \rho \\
\sin \theta_0 \rho \cos \theta \sin \phi - \cos \theta_0 \rho \sin \theta \sin \phi &= \beta \rho \cos \phi \\
\frac{\sin \theta_0}{\beta} \rho \cos \theta \sin \phi - \frac{\cos \theta_0}{\beta} \rho \sin \theta \sin \phi &= \rho \cos \phi
\end{aligned} \tag{A.18}$$

Sean:

$$C = \frac{\sin \theta_0}{\beta}; D = \frac{\cos \theta_0}{\beta}$$

y recordando las coordenadas esféricas (A.1, A.2 y A.3):

$$Cx - Dy = z \tag{A.19}$$

Se encuentra la geodésica de una esfera; un círculo máximo.

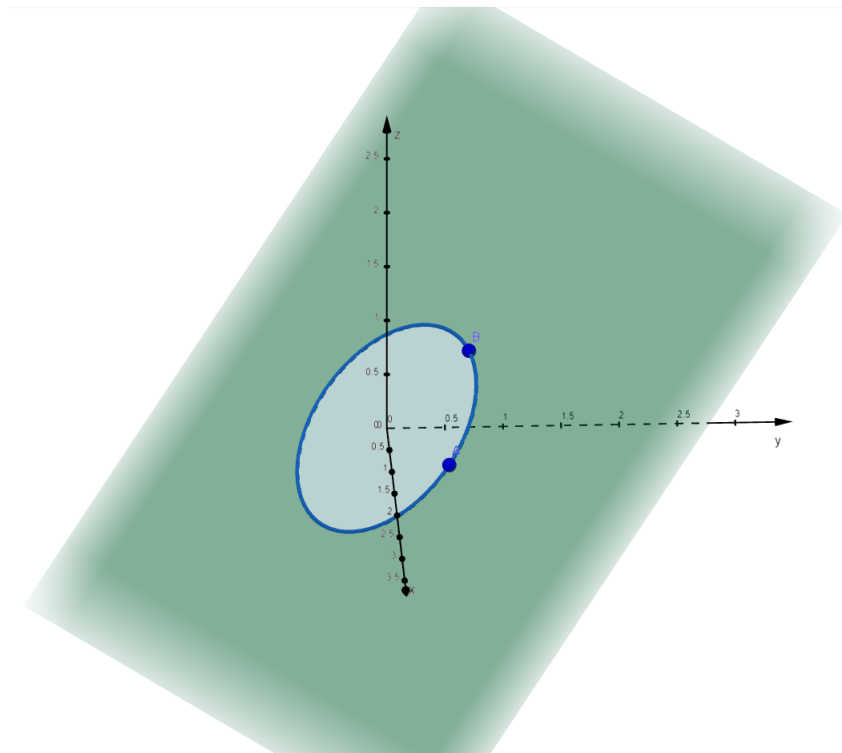


Figura A.2. Distancia geodésica entre A y B; un círculo máximo (elaboración propia)

---

Longitud de arco del círculo máximo

---

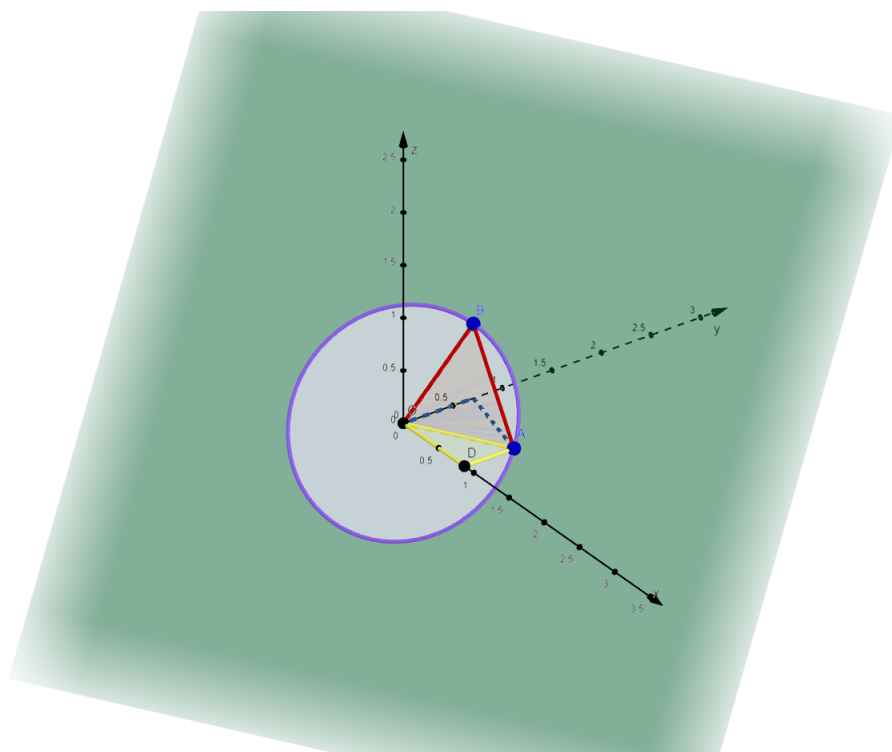


Figura B.1. Componentes de los puntos A y B (elaboración propia)

## B.1. Longitud de arco

Sea la longitud de arco

$$s = \rho \Delta \sigma \quad (\text{B.1})$$

## B.2. Coordenadas esféricas

Asuma dos triángulos rectángulos:  $\triangle OBA$  (color rojo) y  $\triangle OAD$  (color amarillo) donde el punto  $O$  representa el origen y  $D$  un punto auxiliar sobre el eje  $x$  como se muestra en la Figura B.1.

El triángulo  $\triangle OBA$  tiene una hipotenusa unitaria y un ángulo interior  $\phi$ ; por lo tanto:

$$\begin{aligned} \text{cat. op.}_{\triangle OBA} &= \sin \phi \\ \text{cat. ady.}_{\triangle OBA} &= \cos \phi \end{aligned} \quad (\text{B.2})$$

La hipotenusa del triángulo  $\triangle OAD$  corresponde al cateto adyacente de  $\triangle OBA$ . Su ángulo interior es  $\theta$ ; por lo tanto:

$$\begin{aligned} \text{cat. op.}_{\triangle OAD} &= \cos \phi \sin \theta \\ \text{cat. ad.}_{\triangle OAD} &= \cos \phi \cos \theta \end{aligned} \quad (\text{B.3})$$

En base a lo anterior, la componente  $x$  corresponde al cateto adyacente de  $\triangle OAD$ , la  $y$  al cateto opuesto de  $\triangle OAD$  y la  $z$  al cateto opuesto de  $\triangle OBA$ :

$$\begin{aligned} x &= \cos \phi \cos \theta \\ y &= \cos \phi \sin \theta \\ z &= \sin \phi \end{aligned} \quad (\text{B.4})$$

## B.3. Determinación del ángulo central

Sea la ecuación del ángulo entre dos vectores:

$$\vec{A} \cdot \vec{B} = |\vec{A}| |\vec{B}| \cos \Delta \sigma \quad (\text{B.5})$$

y los vectores:

$$\vec{A} = (\cos \phi_1 \cos \theta_1, \cos \phi_1 \sin \theta_1, \sin \phi_1) \quad (\text{B.6})$$

$$\vec{B} = (\cos \phi_2 \cos \theta_2, \cos \phi_2 \sin \theta_2, \sin \phi_2) \quad (\text{B.7})$$

Producto punto entre  $\vec{A}$  y  $\vec{B}$

$$\begin{aligned}
 \vec{A} \cdot \vec{B} &= (\cos \phi_1 \cos \theta_1, \cos \phi_1 \sin \theta_1, \sin \phi_1) \cdot (\cos \phi_2 \cos \theta_2, \cos \phi_2 \sin \theta_2, \sin \phi_2) \\
 &= \cos \phi_2 \cos \theta_1 \cos \phi_2 \cos \theta_2 + \cos \phi_1 \cos \theta_1 \cos \phi_2 \sin \theta_2 + \sin \phi_1 \sin \phi_2 \\
 &= \cos \phi_1 \cos \phi_2 [\cos \theta_1 \cos \theta_2 + \sin \theta_1 \sin \theta_2] + \sin \phi_1 \sin \phi_2 \\
 &= \cos \theta_1 \cos \theta_2 \left[ \frac{\cos(\theta_1 + \theta_2) + \cos(\theta_1 - \theta_2)}{2} + \frac{\cos(\theta_1 - \theta_2) - \cos(\theta_1 + \theta_2)}{2} \right] + \\
 &\quad \sin \phi_1 \sin \phi_2 \\
 &= \cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) + \sin \phi_1 \sin \phi_2
 \end{aligned} \tag{B.8}$$

Producto de las normas de  $\vec{A}$  y de  $\vec{B}$

$$\begin{aligned}
 |\vec{A}| |\vec{B}| &= \sqrt{(\cos \phi_1 \cos \theta_1)^2 + (\cos \phi_1 \sin \theta_1)^2 + \sin \phi_1^2} \cdot \\
 &\quad \sqrt{(\cos \phi_2 \cos \theta_2)^2 + (\cos \phi_2 \sin \theta_2)^2 + \sin \phi_2^2} \\
 &= \sqrt{\cos \phi_1^2 (\cos \theta_1^2 + \sin \theta_1^2) + \sin \phi_1^2} \sqrt{\cos \phi_2^2 (\cos \theta_2^2 + \sin \theta_2^2) + \sin \phi_2^2} \\
 &= \sqrt{\cos \phi_1^2 + \sin \phi_1^2} \sqrt{\cos \phi_2^2 + \sin \phi_2^2} \\
 &= \sqrt{1} \sqrt{1} = 1
 \end{aligned} \tag{B.9}$$

Sustituyendo en (B.5):

$$\begin{aligned}
 \vec{A} \cdot \vec{B} &= |\vec{A}| |\vec{B}| \cos \Delta\sigma \\
 \cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) + \sin \phi_1 \sin \phi_2 &= 1 \cos \Delta\sigma \\
 \arccos(\cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) + \sin \phi_1 \sin \phi_2) &= \arccos(\cos \Delta\sigma) \\
 \implies \arccos(\cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) + \sin \phi_1 \sin \phi_2) &= \Delta\sigma
 \end{aligned} \tag{B.10}$$

Por lo tanto:

$$\begin{aligned}
 s &= \rho \Delta\sigma \\
 \implies s &= \rho \arccos(\cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) + \sin \phi_1 \sin \phi_2)
 \end{aligned} \tag{B.11}$$

## Comercio bilateral: segundo grupo muestral

## C.1. Guatemala - Estados Unidos

Cuadro C.1. Comercio bilateral entre Guatemala y Estados Unidos — periodo filtrado

Variables	PPML — Exp	PPML — Imp	P.EF — log(Exp)	P.EF — log(Imp)
	Coef. (Inf)	Coef. (Inf)	Coef. (Inf)	Coef. (Inf)
(Intercepto)	-53.8223 (Inf)	7.1590*** (1.8321)	—	—
logDist	0.8476 (Inf)	—	—	—
pv_USA	0.1475 (Inf)	—	0.0749 (0.0466)	—
ge_GTM	-0.9337 (Inf)	-1.1525*** (0.2910)	-0.8736* (0.1696)	-0.9510 (0.6117)
va_GTM	-0.1841 (Inf)	—	—	—
log(PIB <sub>GTM</sub> )	0.3050 (Inf)	0.5904*** (0.0804)	0.3301** (0.0314)	0.6073* (0.1181)
Pseudo $R^2$ ajustado	NaN	0.9885	—	—
$R^2$ ajustado	—	—	0.9954	0.9753
Heterocedasticidad	—	—	0.3434	0.0606
Prueba de Pregibon	0.4607	0.1317	—	—
Prueba RESET	—	—	NaN	1.0000
Observaciones	6	6	6	6

## C.2. Guatemala - México

Cuadro C.2. Comercio bilateral entre Guatemala y México — periodo filtrado

Variables	PPML — Exp	PPML — Imp	P.EF — log(Exp)	P.EF — log(Imp)
	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.
(Intercepto)	-4.6569 (Inf)	-0.5812 (1.1808)	—	—
ge_GTM	-2.9264 (Inf)	-1.3780*** (0.2425)	-2.6500 (1.4167)	—
rl_GTM	-1.2323 (Inf)	—	—	—
rq_GTM	3.4704 (Inf)	0.9721 (0.6692)	—	—
va_GTM	3.3345 (Inf)	—	2.0690 (0.8240)	—
log(PIB <sub>GTM</sub> )	0.9381 (Inf)	0.8539*** (0.0457)	0.6731 (0.2871)	1.0741*** (0.0914)
Pseudo $R^2$ ajustado	1.0000	0.9934	—	—
$R^2$ ajustado	—	—	0.9148	0.9648
Heterocedasticidad	—	—	0.9280	0.8483
Prueba de Pregibon	0.0062	0.0026	—	—
Prueba RESET	—	—	NaN	1.0000
Observaciones	6	6	6	6

## C.3. Guatemala - Belice

Cuadro C.3. Comercio bilateral entre Guatemala y Belice — periodo filtrado

Variables	PPML — Exp	PPML — Imp	P.EF — log(Exp)	P.EF — log(Imp)
	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.
(Intercepto)	20.2677 (NaN)	14.3571*** (0.3786)	—	—
pv_BLZ	0.7876 (NaN)	—	0.7876 (Inf)	—
va_BLZ	-4.3012 (NaN)	—	-4.3012 (Inf)	1.5903 (1.2772)
ge_GTM	-3.3156 (NaN)	—	-3.3156 (Inf)	—
rl_GTM	1.9371 (NaN)	—	1.9371 (Inf)	—
rq_GTM	1.4401 (NaN)	—	1.4401 (Inf)	—
va_GTM	—	-3.6925***	—	—

*Continúa en la siguiente página*

Cuadro C.3. (continuación)

Variables	PPML — Exp	PPML — Imp	P.EF — log(Exp)	P.EF — log(Imp)
	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.
log(PIB <sub>GTM</sub> )	—	(0.6230)	—	1.4091* (0.2919)
Pseudo $R^2$ ajustado	NA	0.5138	—	—
$R^2$ ajustado	—	—	-Inf	0.8758
Heterocedasticidad	—	—	0.8893	0.1801
Prueba de Pregibon	NaN	0.9481	—	—
Prueba RESET	—	—	NaN	1.0000
Observaciones	6	6	6	6

#### C.4. Guatemala - El Salvador

Cuadro C.4. Comercio bilateral entre Guatemala y El Salvador — periodo filtrado

Variables	PPML — Exp	PPML — Imp	P.EF — log(Exp)	P.EF — log(Imp)
	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.
(Intercepto)	-14.4856*** (2.0875)	3.3714*** (0.5492)	—	—
log(PIB <sub>SLV</sub> )	1.4845*** (0.0873)	—	1.5206*** (0.1190)	—
va_SLV	—	-0.4759*** (0.0289)	—	-0.4645** (0.0557)
log(PIB <sub>GTM</sub> )	—	0.6955*** (0.0221)	—	0.7024*** (0.0188)
Pseudo $R^2$ ajustado	0.9746	0.9994	—	—
$R^2$ ajustado	—	—	0.9701	0.9985
Heterocedasticidad	—	—	0.9369	0.1800
Prueba de Pregibon	0.6026	0.5429	—	—
Prueba RESET	—	—	1.0000	0.0000
Observaciones	6	6	6	6

## C.5. Guatemala - Honduras

Cuadro C.5. Comercio bilateral entre Guatemala y Honduras — periodo filtrado

Variables	PPML — Exp	PPML — Imp	P.EF — log(Exp)	P.EF — log(Imp)
	Coef.	Coef.	Coef.	Coef.
(Intercepto)	-496.0000 (11548.1890)	-3.6423 (Inf)	—	—
pv_HND	256.0000 (1248.2360)	-0.0448 (Inf)	—	—
ge_GTM	-112.0000 (1139.2100)	-2.3043 (Inf)	-1.0248* (0.1186)	-2.3425* (0.0595)
rl_GTM	—	0.4000 (Inf)	—	0.4150 (0.0538)
rq_GTM	-96.0000 (2011.5190)	0.7866 (Inf)	—	0.7076 (0.0694)
va_GTM	—	—	0.3440* (0.0662)	—
log(PIB <sub>HND</sub> )	22.0000 (547.5510)	—	1.0317*** (0.0271)	—
log(PIB <sub>GTM</sub> )	—	0.9012 (Inf)	—	0.8957** (0.0115)
Pseudo $R^2$ ajustado	NA	1.0000	—	—
$R^2$ ajustado	—	—	0.9995	0.9999
Heterocedasticidad	—	—	0.9196	0.2334
Prueba de Pregibon	0.8173	0.0000	—	—
Prueba RESET	—	—	0.0000	0.0000
Observaciones	6	6	6	6

---

Serie de tiempo del resto de bienes de la industria de extractiva

---

### D.1. Aluminio

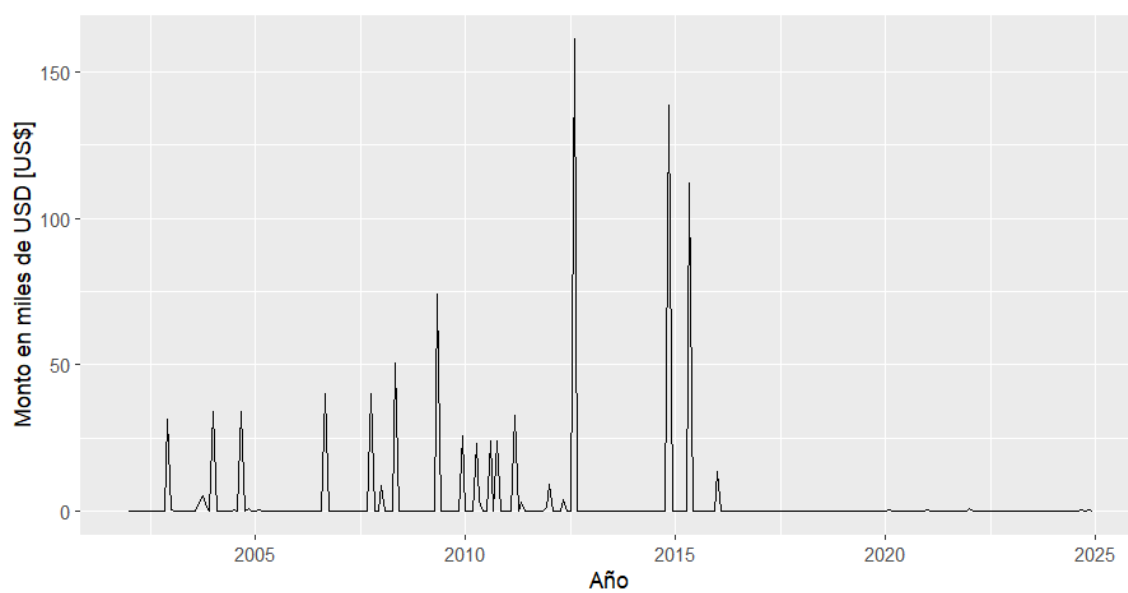


Figura D.1. Importación mensual de aluminio (elaboración propia)

## D.2. Derivados del petróleo

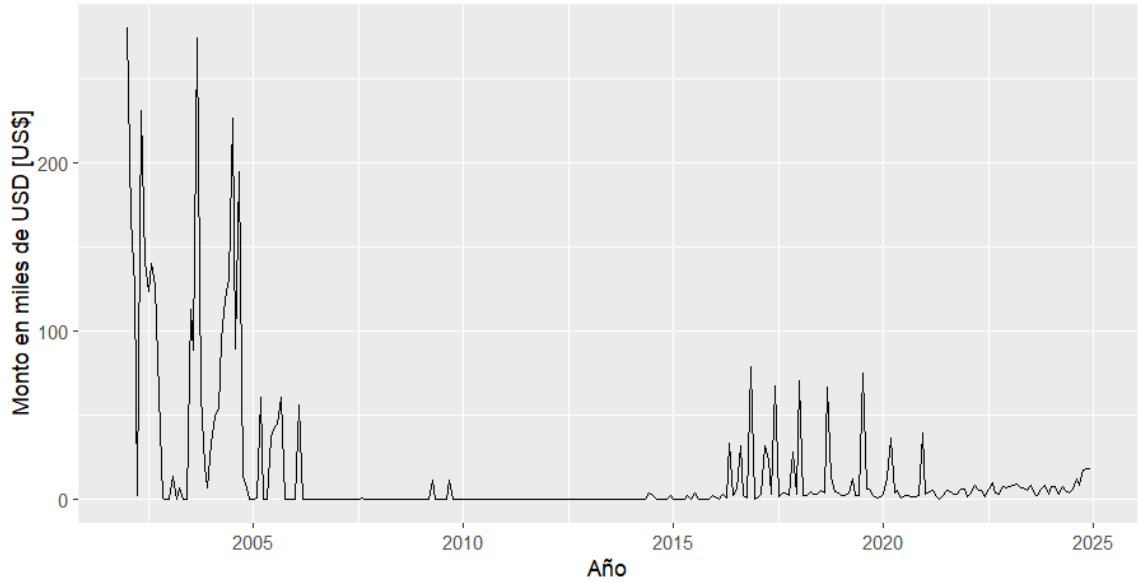


Figura D.2. Importación mensual de derivados del petróleo (elaboración propia)

## D.3. Zinc

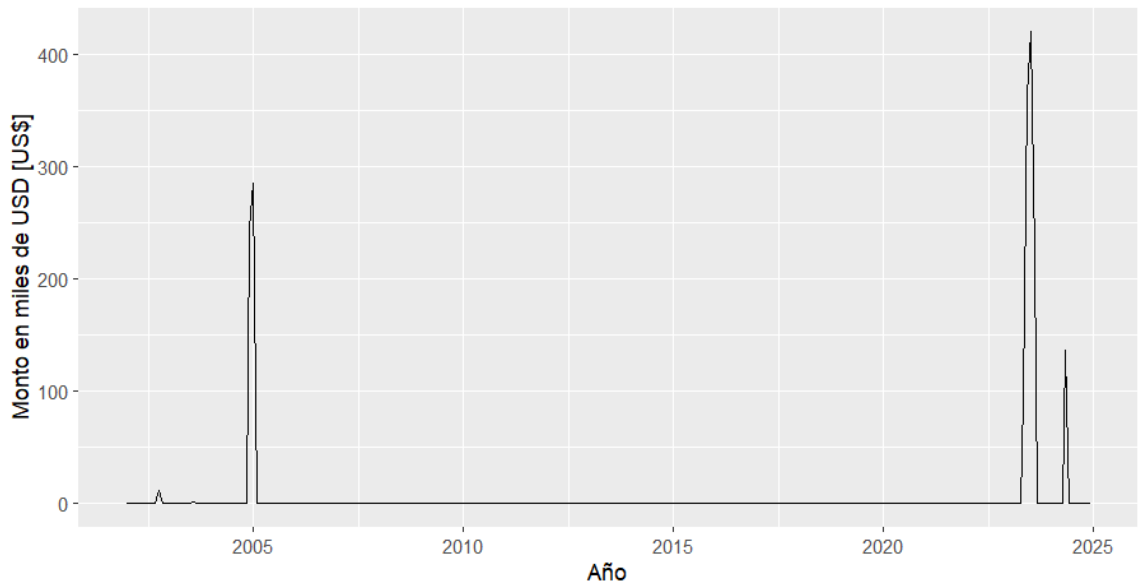


Figura D.3. Importación mensual de zinc (elaboración propia)

- **Balanza comercial:** Diferencia entre el valor total de las exportaciones e importaciones.
- **Bienes:** Objetos tangibles producidos en una sociedad para satisfacer las necesidades de su población.
- **Bloque comercial:** Agrupación de países que logran una integración económica
- **Ceteris Paribus:** Manteniendo el resto de las variables constantes.
- **Ciencias actuariales:** Resuelven problemas de seguras, finanzas y comercio utilizando matemática y estadística.
- **Comercio bilateral:** Intercambio de bienes y servicios entre dos países específicos.
- **Comercio internacional:** Intercambio de bienes y servicios entre múltiples países.
- **Comercio:** Intercambio de bienes y servicios entre compradores y vendedores a través de un medio de cambio aceptado por ambas partes.
- **Déficit comercial:** Ocurre cuando un país tiene más importaciones que exportaciones.
- **Demanda:** Cantidad de bienes y servicios que los compradores están dispuestos a comprar y tienen la capacidad de hacerlo.
- **Dinero fiduciario:** Dinero con valor establecido a través de decretos gubernamentales y respaldados por la confianza en los gobiernos.
- **Dinero:** Es un medio de cambio, unidad de cuenta y un depósito de valor. El primero es un artículo que nosotros, como compradores, le entregamos a los vendedores a cambio de los bienes y servicios; la segunda es ser el medio usado para anunciar el precio o deuda de estos; y la tercera es la probabilidad de transmitir el poder compra del presente al futuro.
- **Exportaciones:** Bienes y servicios producidos en la economía doméstica que se vende en el extranjero.

- **Función de producción con elasticidad de transformación constantes (CET):** Las industrias pueden reasignar su producción entre el mercado interno y el externo, así como dirigir sus exportaciones hacia diferentes destinos.
- **Función de utilidad con elasticidad de sustitución constante (CES):** La facilidad con la que los consumidores sustituyen sus bienes nacionales por internacionales puede diferir de la facilidad con la que sustituyen entre importaciones provenientes de distintos países.
- **Importaciones:** Bienes y servicios producidos en el extranjero que se venden en la economía doméstica.
- **Integración Económica:** Unión de países que buscan aumentar su compraventa, eliminar impuestos, afrontar los desafíos de la globalización, crisis económicas, cambio climático y contribuye a mantener la paz y estabilidad regional entre sus miembros.
- **Modelos autorregresivos:** Utilizan los valores pasados de una misma variable para predecir su comportamiento.
- **Oferta:** Cantidad de bienes y servicios que los vendedores quieren y pueden vender.
- **Precio de equilibrio:** Precio de los bienes y servicios que mantiene la mayor demanda.
- **Procesos estocásticos:** Modelos matemáticos que incorporan la aleatoriedad e incertidumbre para predecir el comportamiento de un sistema.
- **Producto Interno Bruto (PIB):** Valor de mercado de todos los bienes y servicios finales producidos dentro de un país en un periodo determinado.
- **Producto Interno Bruto Nominal:** Cuantifica los bienes y servicios producidos usando los valores actuales del mercado.
- **Producto Nacional Bruto (PNB):** Cuantifica el ingreso total ganado por los residentes permanentes de una nación.
- **Resistencias multilaterales:** Estiman el costo promedio de comerciar con el mundo que tiene cada país o bloque comercial.
- **Servicios:** Actividades intangibles producidas en una sociedad para satisfacer las necesidades de su población.
- **Sistema de gastos puros:** Cada país se especializa en la producción de un producto, no existen tarifas o costos de transporte, los países gastan lo mismo en importaciones y los precios son constantes.
- **Superávit comercial:** Ocurre cuando un país tiene más exportaciones que importaciones.
- **Teoría de ventajas comparativas:** Cada país debe especializarse en la producción de los bienes que se fabriquen con el menor costo de oportunidad. Esto significa que maximiza su comercio al reasignar sus recursos a los bienes donde el país es experto o tiene algún tipo de ventaja.
- **Tratado de Libre Comercio (TLC):** Tratado entre dos o más países que buscan aumentar su compraventa e inversión a través de la transparencia política y eliminación de impuestos.