

Analysis of a VAR Model of Energy Consumption, CO₂ Emissions, Financial Development, Government Expenditure, and Economic Growth in Honduras (1980–2022)

Carlos Rafael Amaya Sarmiento¹; Juan Jacobo Paredes Heller²

¹Universidad Tecnológica Centroamericana (UNITEC), Honduras, amayacrs@unitec.edu

²Universidad Tecnológica Centroamericana (UNITEC), Honduras, jacobo.paredesheller@unitec.edu

Abstract—This study analyzes the interrelationship between economic growth (GDP), per capita electricity consumption (EC), per capita CO₂ emissions (CO₂), financial development (FD), and government expenditure as a percentage of GDP (GOV) in Honduras during the period 1980-2022. Using a VAR model, the temporal dynamics among these variables are evaluated, as well as their cointegration, Granger causality test, impulse response, and variance decomposition. The results show a close relationship between energy consumption, economic growth, and emissions, with significant implications for the country's sustainable development. This study contributes to the understanding of economic-environmental interactions in the context of a developing economy and provides practical insights for designing public policies that integrate environmental sustainability and economic growth.

Keywords— VAR model, economic growth, energy consumption, CO₂ emissions, financial development.

Análisis de un Modelo VAR del Consumo de Energía, Emisiones de CO₂, Desarrollo Financiero, Gasto del Gobierno y Crecimiento Económico en Honduras (1980–2022)

Carlos Rafael Amaya Sarmiento¹; Juan Jacobo Paredes Heller²

¹Universidad Tecnológica Centroamericana, Honduras, amayacrs@unitec.edu

²Universidad Tecnológica Centroamericana, Honduras, jacobo.paredesheller@unitec.edu

Resumen—Este estudio analiza la interrelación entre el crecimiento económico (GDP), el consumo de energía eléctrica per cápita (EC), las emisiones de CO₂ per cápita (CO₂), el desarrollo financiero (FD) y el gasto del gobierno como porcentaje del PIB (GOV) en Honduras durante el período 1980-2022. Utilizando un modelo VAR, se evalúan las dinámicas temporales entre estas variables, así como su cointegración, prueba de causalidad de Granger, respuesta al impulso y descomposición de varianza. Los resultados muestran una estrecha relación entre el consumo de energía, el crecimiento económico y las emisiones, con implicaciones significativas para el desarrollo sostenible del país. Este trabajo contribuye a la comprensión de las interacciones económico-ambientales en el contexto de una economía en desarrollo y provee información práctica para diseñar políticas públicas que integren sostenibilidad ambiental y crecimiento económico.

Palabras clave— modelo VAR, crecimiento económico, consumo de energía, emisiones de CO₂, desarrollo financiero.

I. INTRODUCCIÓN

Honduras ha registrado avances económicos significativos durante las últimas décadas, acompañados de un crecimiento sostenido en el consumo de energía. Estas dinámicas interrelacionadas subrayan el papel crucial que desempeña el consumo energético como motor del crecimiento económico en el país. Según el Fondo Monetario Internacional [1], la electricidad actúa como un conductor esencial de la productividad total de los factores en una economía. Sin embargo, el desarrollo económico en economías como Honduras enfrenta desafíos relacionados con las emisiones de CO₂, las limitaciones en infraestructura energética, y la necesidad de un desarrollo financiero que impulse el acceso a recursos de inversión sostenibles.

La relación entre el consumo de energía y el crecimiento económico ha sido ampliamente discutida en la literatura académica, destacándose como un catalizador clave del desarrollo. Estudios destacan que esta relación puede ser bidireccional [2] o depender del nivel de desarrollo del país. Investigaciones recientes han integrado factores adicionales [3], como las emisiones de CO₂ y el gasto público para capturar mejor las complejas dinámicas entre energía y economía. En el caso de Honduras, estas relaciones han sido poco exploradas, lo que motiva este estudio para abordar esta brecha en la literatura.

Este trabajo emplea un modelo VAR (Vector Autoregresivo) como herramienta principal para analizar las relaciones dinámicas entre el crecimiento económico (GDP), el consumo energético per cápita (EC), las emisiones de CO₂ per cápita (CO₂), el desarrollo financiero (FD) y el gasto público (GOV) durante el período 1980-2022. Adicionalmente, se implementan pruebas de causalidad de Granger [4] para identificar relaciones causales entre las variables, funciones de respuesta al impulso (IRF) para evaluar el impacto de choques en el sistema, y descomposición de la varianza para analizar la contribución relativa de cada variable en la dinámica del sistema. Este trabajo tiene como objetivo analizar las relaciones dinámicas entre el consumo de energía, el crecimiento económico, las emisiones de CO₂, el desarrollo financiero y el gasto público mediante un modelo VAR; examinar las relaciones causales entre estas variables utilizando pruebas de causalidad de Granger; evaluar las relaciones de largo plazo a través de pruebas de cointegración; y analizar la respuesta de las variables a shocks externos utilizando funciones de impulso-respuesta y descomposición de la varianza.

Este enfoque proporciona una base sólida para comprender las complejas interacciones entre energía, economía y medio ambiente en Honduras, con implicaciones significativas para el diseño de políticas públicas que promuevan la sostenibilidad económica y ambiental. De esta manera, el presente estudio contribuye a la literatura existente al centrarse en un país en desarrollo con características económicas, energéticas y ambientales únicas, abordando la necesidad de políticas integradas que equilibren el crecimiento económico y la sostenibilidad ambiental.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

La relación entre el consumo energético y el crecimiento económico ha sido ampliamente documentada en la literatura económica. Estudios globales han identificado patrones variados de causalidad entre energía y crecimiento económico, destacando hipótesis como las de crecimiento, conservación, neutralidad y retroalimentación [2]. Estas hipótesis reflejan diferentes direcciones y fortalezas en la relación entre el

consumo de energía y el crecimiento económico dependiendo del nivel de desarrollo del país y su estructura económica.

En economías en desarrollo, investigaciones sugieren que la causalidad tiende a fluir desde el consumo energético hacia el crecimiento económico [5], resaltando la importancia de invertir en infraestructura energética. Este hallazgo subraya la importancia de invertir en infraestructura energética para garantizar un suministro suficiente que permita apoyar la expansión económica, especialmente en sectores estratégicos como la industria y los servicios.

Por otro lado, la literatura también ha explorado la relación entre el crecimiento económico y las emisiones de CO₂. En economías emergentes, se ha demostrado que el aumento de las emisiones está vinculado a la industrialización y al crecimiento económico, particularmente en sectores como la agricultura y la minería [3]. Investigaciones más recientes han destacado la necesidad de transitar hacia modelos de crecimiento económico sostenibles que reduzcan las emisiones de carbono mediante el uso de energías renovables y tecnologías limpias [6].

En el contexto del desarrollo financiero, se ha señalado que un sistema financiero sólido puede facilitar la inversión en tecnologías limpias y sostenibles, lo cual contribuye a la reducción de las emisiones de CO₂ [7]. En los países en desarrollo, la expansión del crédito al sector privado no solo estimula el crecimiento económico, sino que también actúa como un canal para promover la innovación tecnológica y avanzar hacia la sostenibilidad.

Finalmente, el gasto público ha sido identificado como un motor clave del desarrollo en economías emergentes. Se ha argumentado que las inversiones eficientes en infraestructura, educación y salud pueden generar efectos multiplicadores significativos, promoviendo un crecimiento económico inclusivo [8]. En el caso de Honduras, aunque los estudios específicos son limitados, la evidencia regional sugiere que una gestión eficiente del gasto público puede contribuir a reducir las brechas en infraestructura básica y mejorar la calidad de vida.

A. Contribución del presente estudio

Este estudio proporciona una base sólida para comprender la interacción entre energía, economía y medio ambiente en Honduras, con implicaciones clave para políticas de sostenibilidad. Su enfoque en un país en desarrollo destaca la necesidad de estrategias integradas que equilibren el crecimiento económico y la sostenibilidad ambiental.

B. Tendencias de las Variables

La Figura 1 ilustra la evolución de cinco variables clave relacionadas con el desarrollo económico y energético de Honduras durante el período 1980-2022. A continuación, se presenta un análisis detallado de estas variables, destacando sus tendencias y posibles implicaciones en el contexto hondureño.

C. Análisis de las Variables Primarias y Secundarias

La Figura 1 presenta las tendencias de cinco variables económicas y energéticas clave en Honduras entre 1980 y 2022.

Las variables primarias reflejan el crecimiento económico, el consumo eléctrico y las emisiones de CO₂ en Honduras. Mientras que el PIB y el consumo energético han crecido sostenidamente, las emisiones han mostrado estabilidad, posiblemente por el predominio de energía hidroeléctrica.

Las variables secundarias evidencian estabilidad en el gasto público desde el año 2000, así como un crecimiento sostenido del crédito al sector privado desde la década de 1990, impulsado por reformas financieras.

El análisis conjunto revela una interdependencia entre crecimiento económico, crédito financiero y consumo energético, con estabilidad en las emisiones. Se subraya la importancia de políticas que integren sostenibilidad energética y desarrollo económico.

III. METODOLOGÍA

El presente estudio emplea un enfoque cuantitativo basado en técnicas econométricas avanzadas para analizar las relaciones dinámicas entre el crecimiento económico, el consumo energético, las emisiones de CO₂, el desarrollo financiero y el gasto público en Honduras durante el período 1980-2022. Este enfoque permite evaluar tanto las relaciones de corto como de largo plazo, además de identificar direcciones de causalidad temporal entre las variables clave.

Para ello, se utiliza un modelo VAR (Vector Autoregresivo), que es ampliamente reconocido por su capacidad para analizar interacciones dinámicas y simultáneas entre variables endógenas [9]. Adicionalmente, se implementan pruebas de causalidad de Granger [4] para identificar relaciones predictivas, funciones de respuesta al impulso (IRF) [10] para analizar el impacto de choques exógenos, y descomposición de la varianza para estudiar la contribución relativa de cada variable a las dinámicas del sistema.

A continuación, se describen las herramientas metodológicas empleadas en este análisis.

A. Modelo VAR

El modelo VAR es utilizado para capturar las relaciones dinámicas entre las variables endógenas del sistema. En este caso, el análisis se centra en cinco variables clave: Producto Interno Bruto per cápita (GDP), consumo energético per cápita (EC), emisiones de CO₂ per cápita (CO₂), crédito al sector privado como porcentaje del PIB (FD) y gasto público como porcentaje del PIB (GOV). Este modelo permite estudiar cómo los rezagos de cada variable influyen sobre las demás y sobre sí misma [9].

La estructura general del modelo VAR con p rezagos se expresa como:

$$Y_t = c + \sum_{i=1}^p A_i Y_{t-i} + \epsilon_t, \quad (1)$$

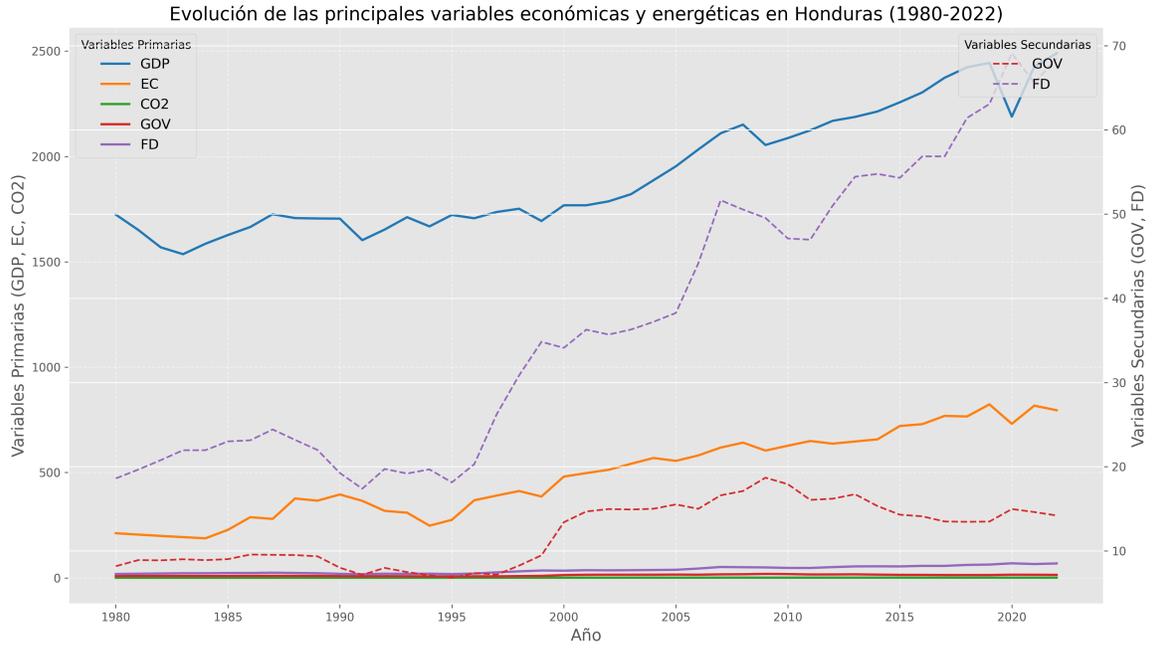


Figura 1: Evolución de las principales variables económicas y energéticas en Honduras (1980-2022). El eje izquierdo representa las variables primarias: Producto Interno Bruto per cápita (GDP, constante 2015 US\$), consumo eléctrico per cápita (EC, kWh per cápita) y emisiones anuales de CO₂ per cápita (toneladas por persona). El eje derecho muestra las variables secundarias: gasto de consumo final del gobierno general (GOV, % del PIB) y crédito al sector privado (FD, % del PIB). Se observa un crecimiento sostenido en el GDP y EC, acompañado de una expansión en el FD, mientras que las emisiones de CO₂ permanecen relativamente estables, indicando un posible uso de fuentes de energía más limpias como la hidroeléctrica.

donde Y_t es el vector de variables endógenas en el tiempo t , c es el vector de términos constantes, A_i son las matrices de coeficientes para los rezagos i , y ϵ_t es el vector de términos de error ($\epsilon_t \sim N(0, \Sigma)$).

B. Prueba de Causalidad de Granger

La prueba de causalidad de Granger se emplea para determinar si los valores pasados de una variable contienen información útil para predecir otra. Este análisis es fundamental para identificar direcciones de causalidad entre las variables clave [4]. El modelo autorregresivo utilizado en esta prueba se expresa como:

$$x_t = c + \sum_{j=1}^n h_j x_{t-j} + \sum_{j=1}^n v_j y_{t-j} + \epsilon_t, \quad (2)$$

donde x_t y y_t son series estacionarias, y la hipótesis nula plantea que y_t no causa x_t en el sentido de Granger.

C. Funciones de Respuesta al Impulso (IRF)

Las IRF permiten analizar cómo un choque exógeno en una variable afecta las demás en el sistema VAR a lo largo del tiempo. Estas funciones se derivan de la representación de media móvil del sistema y proporcionan información clave sobre las interacciones dinámicas [10]. La función de respuesta al impulso, Ψ_s , se define como:

$$\Psi_s = \frac{\partial Y_{t+s}}{\partial U_t} \quad (3)$$

donde Ψ_s cuantifica el efecto de un choque de una desviación estándar en U_t sobre Y_{t+s} después de s periodos. Estas respuestas proporcionan información sobre las interacciones temporales y la causalidad entre las variables del sistema.

D. Descomposición de la Varianza

La descomposición de la varianza analiza la contribución relativa de cada variable a la varianza de los errores de predicción. Esto permite identificar la importancia relativa de los choques en cada variable y su influencia sobre las demás [9]. En el contexto de un modelo VAR, la descomposición de la varianza puede expresarse matemáticamente como:

$$\sigma_{k,j}^2(h) = \frac{\sum_{t=0}^{h-1} \Psi_{k,j,t}^2}{\sum_{t=0}^{h-1} \sum_{j=1}^N \Psi_{k,j,t}^2} \quad (4)$$

donde:

- $\sigma_{k,j}^2(h)$: Proporción de la varianza del error de predicción de la variable k explicada por un choque en la variable j en el horizonte h ,
- $\Psi_{k,j,t}$: Coeficiente de la respuesta al impulso de la variable k con respecto a un choque en la variable j en el rezago t ,
- N : Número total de variables en el sistema,
- h : Horizonte temporal de predicción.

E. Datos y Selección de Rezagos

Este estudio utiliza datos anuales para el período 1980-2022 provenientes de fuentes confiables como el Banco Mundial (WDI), USEIA y Our World in Data. Para garantizar la robustez del modelo, los rezagos óptimos se seleccionan utilizando criterios de información como el Akaike (AIC) y el Schwarz (BIC) [11]. Las variables consideradas se presentan en la Tabla I:

TABLA I: Descripción de las Variables Utilizadas en el Estudio

Variable	Descripción	Fuente
GDP	Producto Interno Bruto per cápita (constante 2015 US\$)	WDI
EC	Consumo de energía eléctrica per cápita (kWh)	EIA
CO ₂	Emisiones anuales de CO ₂ per cápita (toneladas por persona)	Our World in Data
FD	Crédito del sector monetario al sector privado (% del PIB)	WDI
GOV	Gasto de consumo final del gobierno general (% del PIB)	WDI

Las variables seleccionadas en este estudio tienen un respaldo teórico sólido en la literatura. El PIB per cápita (GDP) se utiliza frecuentemente como proxy del crecimiento económico [6]. El consumo de energía (EC) y las emisiones de CO₂ [12] reflejan la interacción entre la actividad económica y los costos ambientales. El desarrollo financiero (FD), medido como crédito al sector privado, ha sido identificado como un motor de crecimiento económico [13]. Finalmente, el gasto público (GOV) captura el rol del sector gubernamental en la economía, especialmente en la provisión de bienes públicos [14].

IV. ANÁLISIS ECONÓMETRICO

A. Análisis de la respuesta de Correlación

La Figura 2 presenta la matriz de correlación entre las variables estudiadas, que permite evaluar la intensidad y dirección de las relaciones lineales entre estas.

Relaciones Altamente Positivas:

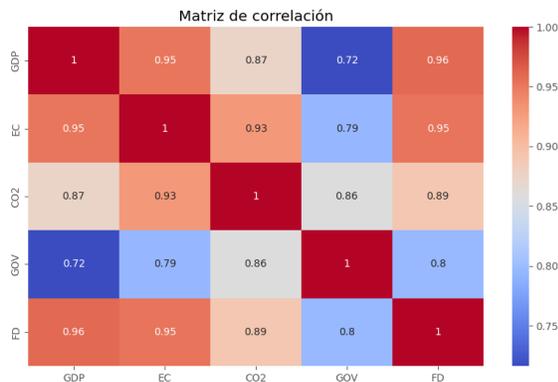


Figura 2: Matriz de Correlación

- Existe una correlación alta y positiva entre el PIB per cápita (*GDP*) y el consumo de energía (*EC*), con un coeficiente de 0.95. Esto refuerza la relación estrecha entre el crecimiento económico y la demanda energética.
- De manera similar, *GDP* también presenta una correlación significativa con las emisiones de CO₂ (*CO₂*), lo que refleja el impacto ambiental asociado al desarrollo económico.

Correlaciones Moderadas:

- El gasto público (*GOV*) muestra correlaciones moderadas con *GDP* (0.72) y *EC* (0.79). Esto sugiere que la inversión gubernamental puede influir indirectamente en el crecimiento económico, posiblemente a través del desarrollo de infraestructura.
- El desarrollo financiero (*FD*) tiene una correlación fuerte con *GDP* (0.96) y *EC* (0.95), indicando su papel crítico en facilitar inversiones que impulsen el crecimiento y la demanda energética.

Conclusiones Iniciales:

- Las altas correlaciones entre *GDP*, *EC* y *CO₂* refuerzan la necesidad de estrategias que desacoplen el crecimiento económico del impacto ambiental.
- El papel del gasto público y el desarrollo financiero, aunque menos evidente en esta matriz, podría ser clave en las dinámicas de largo plazo y debe explorarse más a fondo mediante análisis adicionales.

B. Pruebas de Estacionariedad de las Variables

La estabilidad de las series temporales en su integración es un requisito fundamental para aplicar el modelo VAR, ya que garantiza que las relaciones dinámicas entre las variables sean consistentes y no se vean afectadas por tendencias espurias. La prueba ADF (Dickey-Fuller Aumentada) evalúa si las series son estacionarias bajo la hipótesis nula de raíz unitaria, mientras que la prueba KPSS (Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin) considera como hipótesis nula que la serie es estacionaria en torno a su media o tendencia determinista [15], [16].

En este análisis, los resultados indican que las series no son estacionarias en niveles, lo cual es común en datos económicos. Esto sugiere la necesidad de tomar la primera diferencia de las series para lograr estacionariedad, como se detalla en la Tabla II. La integración adecuada de las series asegura que las estimaciones del modelo VAR sean consistentes y permitan una interpretación confiable de las relaciones entre las variables.

Cabe destacar que la estacionariedad en diferencias es una propiedad deseable en análisis econométricos, ya que previene problemas de raíz unitaria que podrían generar resultados sesgados o inconsistentes en la modelación econométrica. Además, esta característica permite avanzar hacia un análisis de cointegración, ya que una vez que las series son integradas del mismo orden, pueden evaluarse relaciones de largo plazo entre las variables económicas clave.

Estos resultados confirman que las series cumplen con los requisitos para avanzar hacia el análisis VAR y las pruebas de cointegración, que se discutirán en la siguiente sección.

TABLA II: Resultados de las pruebas de estacionariedad (ADF y KPSS)

Variable	Nivel	Primera Diferencia	Conclusión
GDP	No estacionaria	Estacionaria	$I(1)$
EC	No estacionaria	Estacionaria	$I(1)$
CO ₂	No estacionaria	Estacionaria	$I(1)$
GOV	No estacionaria	Estacionaria	$I(1)$
FD	No estacionaria	Estacionaria	$I(1)$

Nota: Todas las variables son integradas de primer orden ($I(1)$), lo que justifica el uso de pruebas de cointegración para identificar relaciones de equilibrio a largo plazo.

C. Prueba de Cointegración de Johansen

La prueba de cointegración de Johansen es un método basado en el modelo VAR que permite identificar la existencia de relaciones de largo plazo entre variables económicas. Antes de realizar la prueba, se estableció el modelo VAR entre las variables del estudio para determinar el orden óptimo de rezagos, utilizando los criterios de información de Akaike (AIC) y Schwarz (BIC). Como resultado, el orden de rezagos seleccionado fue de 5, tras cálculos iterativos y análisis comparativo.

TABLA III: Resultados de la Prueba de Cointegración de Johansen

Eigenvalue	Trace Stat.	CV 90 %	CV 95 %	CV 99 %	Cointegración
0.3168	35.14	44.49	47.85	54.68	Falsa
0.1980	18.16	27.07	29.80	35.46	Falsa
0.1184	7.75	13.43	15.49	19.94	Falsa
0.0785	3.05	2.71	3.84	6.63	Falsa

Nota: No se encontró evidencia de cointegración. Las estadísticas de traza son menores que los valores críticos en todos los casos.

La metodología Johansen asume que las variables deben seguir una tendencia lineal, y las ecuaciones de cointegración pueden incluir un intercepto para capturar dicha tendencia. Los resultados de la prueba, presentados en la Tabla III, no muestran evidencia significativa de cointegración entre las variables. Esto implica que, aunque las variables pueden estar correlacionadas en el corto plazo, no mantienen relaciones de equilibrio a largo plazo.

Este hallazgo justifica el uso de un modelo VAR en diferencias, que se enfoca en analizar dinámicas de corto plazo sin asumir la existencia de vínculos de largo plazo entre las variables.

La Tabla III presenta los resultados de la prueba de cointegración de Johansen, la cual evalúa la existencia de relaciones de largo plazo entre las variables del modelo. Se utilizaron niveles de significancia del 90 %, 95 % y 99 %.

Las estadísticas de traza son menores que los valores críticos en todos los niveles de significancia, indicando la ausencia

de relaciones de largo plazo entre las variables. La falta de cointegración sugiere que, aunque correlacionadas en el corto plazo, las variables no siguen una tendencia común a largo plazo. Esto justifica el uso de un modelo VAR en diferencias, que captura relaciones dinámicas sin asumir equilibrio a largo plazo.

D. Selección del Orden Óptimo de Rezagos

La Tabla IV presenta los valores calculados para los criterios de información AIC, BIC, FPE y HQIC en diferentes órdenes de rezago (p) del modelo VAR. Estos criterios ayudan a identificar el número óptimo de rezagos que captura adecuadamente las relaciones dinámicas entre las variables sin sobreajustar el modelo.

■ Interpretación de los resultados:

- AIC recomienda un rezago de $p = 5$, ya que minimiza su valor.
- BIC, más conservador, sugiere $p = 0$, favoreciendo un modelo más simple.
- FPE y HQIC también indican $p = 0$, sugiriendo que los datos pueden explicarse con menos rezagos.

■ Implicaciones para el modelo VAR:

- La selección del rezago depende del equilibrio entre parsimonia y capacidad explicativa.
- Para capturar relaciones más complejas, AIC recomienda $p = 5$.

Conclusión: Se optó por $p = 5$ siguiendo el criterio AIC, priorizando la captura de dinámicas entre variables, consistente con el enfoque del análisis VAR.

TABLA IV: Orden Óptimo de Rezagos según Criterios de Información

Rezago (p)	AIC	BIC	FPE	HQIC
0	11.65	11.87	1.149e+05	11.73
1	11.75	13.05	1.289e+05	12.21
2	12.35	14.72	2.507e+05	13.19
3	12.40	15.85	3.211e+05	13.63
4	12.48	17.00	5.268e+05	14.09
5	11.32	16.93	3.818e+05	13.32

Notas: Los valores destacados indican el mínimo según cada criterio de información. Los criterios evaluados incluyen el AIC (Akaike Information Criterion), BIC (Bayesian Information Criterion), FPE (Final Prediction Error) y HQIC (Hannan-Quinn Information Criterion).

V. ANÁLISIS DE RESULTADOS

1. *Estructura del modelo VAR:* El modelo VAR permitió analizar las relaciones dinámicas entre las cinco variables

clave. Las ecuaciones se expresan como:

$$GDP_t = \alpha_1 + \sum_{i=1}^p \beta_{11,i} GDP_{t-i} + \sum_{i=1}^p \beta_{12,i} EC_{t-i} + \sum_{i=1}^p \beta_{13,i} CO2_{t-i} + \sum_{i=1}^p \beta_{14,i} GOV_{t-i} + \sum_{i=1}^p \beta_{15,i} FD_{t-i} + \epsilon_{1t} \quad (5)$$

donde: GDP_t : PIB per cápita, EC_t : Consumo energético, $CO2_t$: Emisiones de CO₂, GOV_t : Gasto público, FD_t : Crédito al sector privado.

Los coeficientes estimados destacan que los cambios en EC afectan el GDP a corto plazo, mientras que GOV tiene interacciones limitadas. Además, $CO2$ muestra una relación moderada con EC , reflejando la dependencia de fuentes no limpias.

TABLA V: Resultados Estimados del Modelo VAR

Variable Dependiente	Coefficiente	Error Estándar	T-Stat	P-Valor
Ecuación para GDP				
Constante	19.0496	24.3696	0.782	0.434
L1.GDP	0.0656	0.2550	0.257	0.797
L1.EC	0.2099	0.4359	0.482	0.630
L1. CO ₂	-280.774	318.312	-0.882	0.378
L1.GOV	-15.422	18.5027	-0.834	0.405
L1.FD	9.7281	7.2095	1.349	0.177
Ecuación para EC				
Constante	2.4999	12.8307	0.195	0.846
L1.GDP	0.1248	0.1342	0.929	0.353
L1.EC	0.0872	0.2295	0.380	0.704
L1. CO ₂	-26.5254	167.593	-0.158	0.874
L1.GOV	-23.701	9.7418	-2.433	0.015
L1.FD	10.6611	3.7958	2.809	0.005
Ecuación para CO₂				
Constante	0.0328	0.0200	1.636	0.102
L1.GDP	0.0005	0.0002	2.153	0.031
L1.EC	0.0002	0.0004	0.503	0.615
L1. CO ₂	-0.6724	0.2618	-2.568	0.010
L1.GOV	0.0120	0.0152	0.786	0.432
L1.FD	0.0033	0.0059	0.557	0.577

Notas: Los coeficientes significativos al nivel del 5% están marcados en **negrita**. Los p-valores indican el nivel de significancia estadística. Lx.VAR representa el rezago x de cada variable.

La Tabla V presenta los resultados estimados del modelo VAR, en el cual se analizan las relaciones dinámicas entre las variables estudiadas: el PIB per cápita (GDP), el consumo de energía per cápita (EC), las emisiones de CO₂ per cápita (CO_2), el desarrollo financiero (FD) y el gasto gubernamental (GOV). A continuación, se detallan los principales hallazgos:

1a. Ecuación para el PIB per cápita (GDP): En esta ecuación, se observa que los coeficientes asociados a los rezagos de las variables analizadas no son estadísticamente significativos al nivel del 5%. Esto incluye tanto los rezagos de GDP como de EC , CO_2 , GOV y FD . Aunque el coeficiente del primer rezago de FD presenta un p -valor de 0.177, relativamente bajo en comparación con los demás, este valor no alcanza significancia estadística.

Implicación: Los resultados sugieren que el crecimiento económico (GDP) no está fuertemente influido por las variables en los rezagos analizados. Esto podría indicar que el

crecimiento económico depende de efectos acumulativos o de factores adicionales no considerados en el modelo.

1b. Ecuación para el Consumo de Energía per cápita (EC): En esta ecuación, los coeficientes asociados a $L1.GOV$ ($-23,701, p = 0,015$) y $L1.FD$ ($10,661, p = 0,005$) son estadísticamente significativos. Estos resultados muestran que un mayor gasto gubernamental en el rezago 1 tiene un efecto negativo sobre el consumo energético, mientras que un mayor desarrollo financiero en el rezago 1 incrementa el consumo energético.

Implicación: El desarrollo financiero está estrechamente relacionado con la demanda de energía, lo que podría reflejar un aumento en actividades económicas impulsadas por el crédito y las inversiones. Por otro lado, la relación negativa entre el gasto gubernamental y el consumo energético podría deberse a políticas públicas destinadas a la eficiencia energética o a cambios en la composición del gasto.

1c. Ecuación para las Emisiones de CO₂ per cápita (CO₂): En esta ecuación, el primer rezago de GDP tiene un efecto positivo y significativo ($0,0005, p = 0,031$), lo que indica que el crecimiento económico afecta ligeramente las emisiones de CO₂. Además, el coeficiente asociado al primer rezago de CO_2 es negativo y significativo ($-0,6724, p = 0,010$), lo que sugiere un ajuste de las emisiones en función de los valores previos.

Implicación: Las emisiones de CO₂ están influenciadas tanto por el crecimiento económico como por sus propios valores pasados. Esto podría reflejar una relación estructural entre la actividad económica y las emisiones, pero también la presencia de mecanismos de corrección o políticas ambientales. Estos resultados coinciden parcialmente con los hallazgos reportados en estudios previos para economías en desarrollo, donde el crecimiento económico muestra efectos significativos sobre las emisiones de carbono y el consumo energético, particularmente cuando el desarrollo financiero actúa como catalizador de la inversión y la demanda energética [6], [12].

1d. Implicaciones Generales del Modelo: Los resultados del modelo muestran que:

- **Relaciones significativas:** Solo algunos coeficientes resultan estadísticamente significativos, principalmente en las ecuaciones para EC y CO_2 . Esto podría indicar que las relaciones entre las variables no son inmediatas y requieren considerar más rezagos.
- **Impacto del desarrollo financiero:** FD tiene un impacto significativo en el consumo energético, lo que refuerza la idea de que el acceso al crédito y la inversión tienen un papel clave en la dinámica económica y energética.
- **Estabilidad de las emisiones:** La baja variabilidad en los coeficientes asociados a las emisiones de CO_2 puede reflejar una dependencia limitada de actividades altamente contaminantes en la economía hondureña.

Conclusión: En general, el modelo VAR muestra que las dinámicas entre las variables analizadas son complejas, con pocas relaciones significativas a corto plazo. Esto refuerza la necesidad de un análisis más profundo, incluyendo posibles

factores exógenos y pruebas de robustez para validar los hallazgos.

A. Resultados de la Prueba de Causalidad de Granger

Los resultados de la prueba de causalidad de Granger presentados en la Tabla VI permiten evaluar las relaciones causales entre las variables económicas, energéticas y ambientales incluidas en este estudio. A continuación, se describen los principales hallazgos:

1. Relaciones causales significativas:

- **Gasto del Gobierno (GOV) y Emisiones de CO₂ (CO₂):** Se encuentra evidencia significativa de que GOV causa CO₂ ($P\text{-Value} = 0,0084$). Esto sugiere que los cambios en el gasto público tienen un impacto directo en las emisiones de dióxido de carbono. Este hallazgo podría atribuirse a políticas públicas que afectan sectores intensivos en carbono, como transporte, infraestructura y producción industrial.
- **Desarrollo Financiero (FD) y Emisiones de CO₂ (CO₂):** El FD también muestra una relación causal significativa hacia CO₂ ($P\text{-Value} = 0,0179$). Esto indica que el aumento en la disponibilidad de crédito y financiamiento puede estar relacionado con actividades económicas que incrementan las emisiones de carbono, como la expansión de sectores industriales o el uso intensivo de energía.

2. *Relaciones causales no significativas:* La mayoría de las relaciones evaluadas no muestran evidencia significativa de causalidad en el sentido de Granger, lo que implica que los valores pasados de una variable no contribuyen de manera concluyente a predecir los valores presentes de otra. Algunas observaciones relevantes incluyen:

- **Producto Interno Bruto (GDP) y Consumo de Energía (EC):** Aunque la relación entre GDP y EC presenta un $P\text{-Value} = 0,0667$, cercano al nivel de significancia, no alcanza el umbral del 5%. Esto sugiere una posible relación débil entre ambas variables que no resulta concluyente bajo los criterios estadísticos utilizados.
- **Consumo de Energía (EC) y Producto Interno Bruto (GDP):** Los resultados no muestran evidencia de que EC tenga un impacto directo en GDP ($P\text{-Value} = 0,6005$). Esto puede indicar una relación más compleja, posiblemente mediada por otras variables, o una dependencia que se manifiesta a través de dinámicas de largo plazo.
- **Emisiones de CO₂ (CO₂) y otras variables:** Aunque CO₂ no causa significativamente ninguna de las variables en el análisis, los resultados reflejan que CO₂ es causado por GOV y FD, lo que subraya su papel como variable dependiente de las decisiones financieras y las políticas públicas.

3. *Implicaciones de los resultados:* Los hallazgos tienen varias implicaciones para las políticas públicas y el diseño de estrategias de desarrollo sostenible en Honduras:

TABLA VI: Resultados de la Prueba de Causalidad de Granger

Causante	Causada	Estadístico	P-Valor	Conclusión
GDP	EC	2.28	0.067	No Significativa
GDP	CO ₂	1.58	0.209	No Significativa
GDP	GOV	0.34	0.709	No Significativa
GDP	FD	0.53	0.598	No Significativa
EC	GDP	3.01	0.039	Significativa
EC	CO ₂	0.74	0.477	No Significativa
EC	GOV	0.03	0.864	No Significativa
EC	FD	1.43	0.232	No Significativa
CO ₂	GDP	0.16	0.686	No Significativa
CO ₂	EC	1.29	0.258	No Significativa
CO ₂	GOV	0.28	0.601	No Significativa
CO ₂	FD	1.82	0.180	No Significativa
GOV	GDP	3.63	0.009	Significativa
GOV	EC	1.24	0.298	No Significativa
GOV	CO ₂	2.54	0.079	No Significativa
GOV	FD	1.05	0.389	No Significativa
FD	GDP	1.25	0.291	No Significativa
FD	EC	1.57	0.208	No Significativa
FD	CO ₂	2.19	0.081	No Significativa
FD	GOV	0.87	0.423	No Significativa

Nota: Los resultados muestran relaciones causales evaluadas mediante la prueba de causalidad de Granger. Se considera significativa una relación cuando el valor p ($P\text{-Value}$) es menor a 0.05.

- **Relación entre políticas y emisiones:** Las relaciones significativas entre GOV, FD y CO₂ destacan la necesidad de considerar las políticas públicas y financieras en la gestión de emisiones de carbono. En particular, es crucial diseñar políticas que incentiven el uso de tecnologías limpias y la eficiencia energética en sectores clave.
- **Complejidad de las relaciones económicas:** La falta de relaciones causales significativas entre GDP, EC y otras variables sugiere que las interacciones entre estas pueden depender de factores adicionales o manifestarse a través de dinámicas de largo plazo, lo que podría investigarse mediante un análisis de cointegración o modelos más específicos.
- **Orientación hacia el desarrollo sostenible:** Las políticas deben enfocarse en mitigar los impactos ambientales del crecimiento económico y del desarrollo financiero, promoviendo inversiones que reduzcan las emisiones de carbono sin comprometer el crecimiento económico.

Estos resultados destacan la importancia de un enfoque integrado en el análisis de políticas económicas, energéticas y ambientales, subrayando la relevancia del modelo VAR como herramienta para evaluar las interacciones dinámicas entre estas variables.

B. Funciones de Respuesta al Impulso (IRF)

Las funciones de respuesta al impulso permitieron analizar los efectos dinámicos de choques exógenos en las variables del sistema. Los resultados más relevantes son los siguientes:

1. El choque positivo en el consumo energético (EC) genera un impacto significativo en el Producto Interno Bruto (GDP) a corto plazo, lo que refuerza la relación bidireccional entre el crecimiento económico y la demanda energética.

2. Las emisiones de CO₂ (CO₂) responden significativamente ante los choques en EC, reflejando la dependencia de la matriz energética en fuentes no completamente limpias.

3. Los choques en el gasto público (GOV) tienen efectos limitados sobre GDP y EC, lo que podría estar asociado a la ineficiencia en la asignación de recursos fiscales.

4. Los choques en el desarrollo financiero (FD) tienen un impacto positivo no transitorio en el crecimiento económico, sugiriendo la necesidad de políticas que fortalezcan el acceso al crédito a largo plazo.

5. Los resultados también destacan la importancia de analizar las interacciones dinámicas en horizontes temporales más largos, ya que algunos efectos de los choques tardan en manifestarse plenamente en las variables económicas clave.

Estos hallazgos refuerzan la necesidad de un enfoque integrado en el diseño de políticas económicas que considere no solo los efectos directos de los choques en una variable específica, sino también las interacciones que se producen dentro del sistema en su conjunto. Además, destacan la utilidad del análisis VAR para identificar estas interacciones, proporcionando una visión más completa de las relaciones dinámicas entre energía, economía y medio ambiente.

Adicionalmente, el análisis de las IRF pone en evidencia la importancia de observar las respuestas diferenciadas entre las variables clave a lo largo de diferentes horizontes temporales. Esto permite identificar no solo los efectos inmediatos de los choques, sino también las posibles implicaciones de mediano y largo plazo, especialmente en el contexto de estrategias de desarrollo sostenible.

El análisis de las IRF destaca cómo los efectos de los choques exógenos no son uniformes, sino que varían según las características intrínsecas de cada variable. Por ejemplo, mientras el impacto en GDP tiende a ser inmediato, los efectos sobre FD y CO₂ muestran una dinámica más prolongada. Esto sugiere que el tiempo de respuesta de las políticas públicas debe alinearse con el horizonte temporal de los efectos observados para maximizar su efectividad. Además, estos resultados subrayan la importancia de considerar las interdependencias entre las variables para evitar políticas fragmentadas que puedan generar efectos no deseados.

C. Descomposición de la Varianza

La descomposición de la varianza complementa las IRF al cuantificar la proporción de la varianza explicada por los choques en cada variable a diferentes horizontes temporales. Los resultados clave incluyen:

- Los choques en EC explican una proporción significativa de la varianza del GDP en horizontes de corto plazo, destacando la importancia de la energía para el crecimiento económico.
- Las emisiones de CO₂ son explicadas principalmente por choques internos, indicando que los factores externos tienen un impacto limitado en esta variable.
- En horizontes más largos, los choques en FD contribuyen de manera moderada a la varianza de GDP, reafirmando

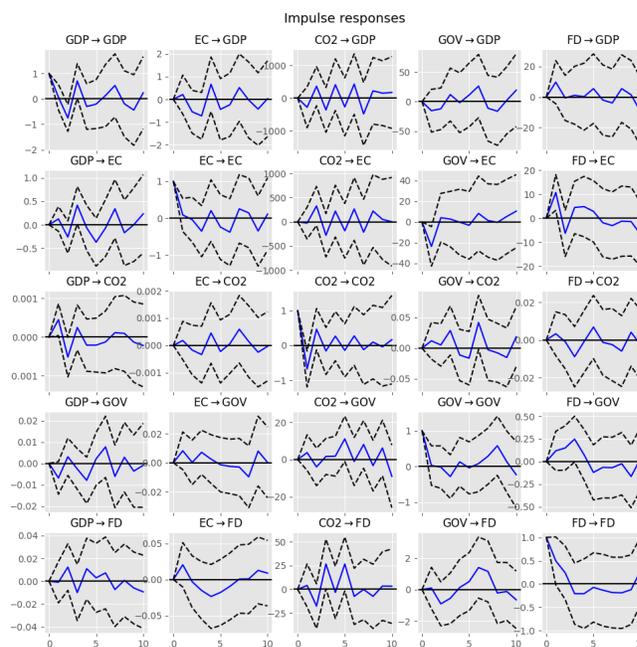


Figura 3: Funciones de Respuesta al Impulso (IRF)

el rol del desarrollo financiero como impulsor del crecimiento económico.

D. Implicaciones

Estos hallazgos destacan la importancia de políticas públicas orientadas a:

- Modernizar la infraestructura energética y promover la transición hacia fuentes renovables para garantizar un crecimiento económico sostenible.
- Reorientar el gasto público hacia sectores estratégicos con mayor potencial de impacto económico.
- Fortalecer el desarrollo financiero con un enfoque en proyectos sostenibles y de largo plazo.
- Integrar estrategias ambientales y económicas para mitigar las emisiones de CO₂ sin comprometer el crecimiento económico.

El análisis conjunto de las IRF y la descomposición de la varianza proporciona una visión integral de las interacciones dinámicas entre las variables económicas, energéticas y ambientales en Honduras, identificando áreas clave para mejorar la formulación de políticas.

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DE POLÍTICA

Este estudio utilizó un modelo VAR para analizar las relaciones dinámicas entre el crecimiento económico (GDP), el consumo de energía eléctrica (EC), las emisiones de CO₂ (CO₂), el desarrollo financiero (FD) y el gasto del gobierno (GOV) en Honduras durante el período 1980-2022. A partir de los resultados obtenidos, se destacan las siguientes conclusiones:

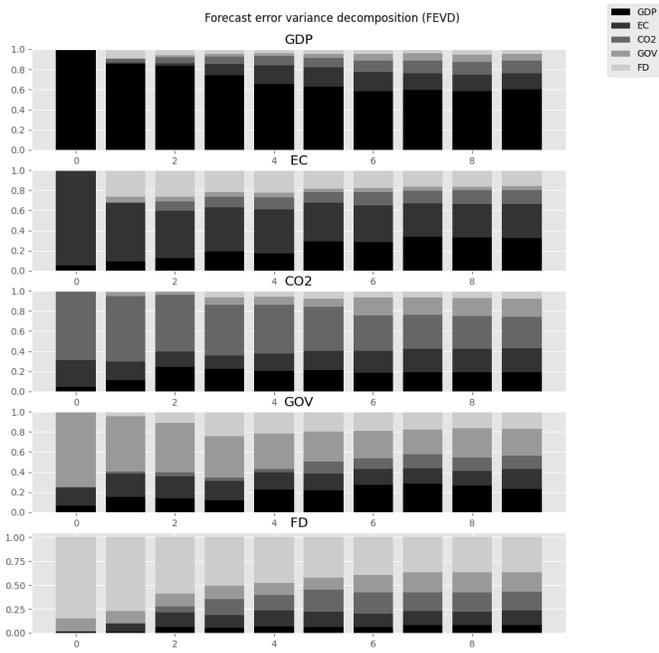


Figura 4: Descomposición de la Varianza

A. Conclusiones Principales

1) **Interacción entre crecimiento económico y consumo energético:** El análisis de las IRF confirma una relación bidireccional entre el *GDP* y el *EC*, lo que subraya la necesidad de inversiones en infraestructura energética para sostener el desarrollo económico y garantizar la estabilidad energética.

2) **Impactos limitados del gasto público:** Los choques en *GOV* tienen un efecto reducido sobre el *GDP* y el *EC*, lo que sugiere que la asignación actual de recursos fiscales no maximiza su impacto en sectores estratégicos. Es necesario reorientar el gasto público para generar un mayor efecto multiplicador.

3) **Sostenibilidad ambiental y emisiones de CO₂:** Las respuestas de las emisiones de CO₂ a choques en el consumo energético reflejan la dependencia de fuentes no limpias en la matriz energética, enfatizando la necesidad de promover la transición hacia energías renovables y reducir la dependencia de combustibles fósiles.

4) **Rol moderado del desarrollo financiero:** Si bien los choques en *FD* tienen efectos positivos en el *GDP*, estos son transitorios. Esto subraya la importancia de promover un sistema financiero eficiente que apoye proyectos de largo plazo y alto impacto.

5) **Resiliencia de las emisiones:** Las emisiones de CO₂ responden principalmente a choques internos, lo que resalta el predominio de fuentes renovables en la matriz energética y su contribución a mitigar los impactos ambientales de los choques económicos.

Estas conclusiones refuerzan la importancia de un enfoque integrado en la formulación de políticas públicas que balanceen crecimiento económico, sostenibilidad ambiental y

desarrollo financiero en Honduras.

B. Direcciones futuras

Para fortalecer estos hallazgos, investigaciones futuras podrían ampliar el análisis con modelos estructurales o dinámicos que consideren factores exógenos, como los precios internacionales de energía o los efectos del cambio climático. Además, estudios comparativos con otros países de la región permitirían contextualizar mejor las dinámicas económicas y energéticas de Honduras.

C. Agradecimientos

Agradecemos al Grupo de Investigación en Economía y Empresa de la Universidad Tecnológica Centroamericana (UNITEC) por su apoyo y orientación en el desarrollo de esta investigación. Su compromiso con la excelencia académica ha sido clave para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Fondo Monetario Internacional, *World Economic Outlook: Adjusting to Lower Commodity Prices*. Washington, DC: International Monetary Fund, 2015.
- [2] I. Ozturk, "A literature survey on energy-growth nexus," *Energy Policy*, vol. 38, no. 1, pp. 340-349, 2010.
- [3] N. Apergis and J. Payne, "Co2 emissions, energy usage, and output in central america," *Energy Policy*, vol. 37, no. 8, pp. 3282-3286, 2009.
- [4] C. W. J. Granger, "Investigating causal relations by econometric models and cross-spectral methods," *Econometrica*, vol. 37, no. 3, pp. 424-438, 1969.
- [5] P. K. Narayan and N. Doytch, "Does fdi influence renewable energy consumption? analyzing the role of political and economic risks," *Energy Economics*, vol. 62, pp. 359-372, 2017.
- [6] M. Shahbaz, H. H. Lean, and A. Bhattacharya, "The dynamics of electricity consumption, economic growth and co2 emissions in malaysia: Evidence from cointegration and vector error correction model," *Energy*, vol. 71, pp. 548-557, 2016.
- [7] U. Al-Mulali, L. C. Ozturk, and B. F. Solarin, "Investigating the environmental kuznets curve hypothesis in seven regions: The role of renewable energy," *Ecological Indicators*, vol. 67, pp. 267-282, 2015.
- [8] C. Calderón and L. Servén, "Infrastructure and economic development in sub-saharan africa," *Journal of African Economies*, vol. 19, no. 1, pp. 13-87, 2010.
- [9] C. A. Sims, "Macroeconomics and reality," *Econometrica*, vol. 48, no. 1, pp. 1-48, 1980.
- [10] J. D. Hamilton, *Time Series Analysis*. Princeton University Press, 1994.
- [11] H. Akaike, "A new look at the statistical model identification," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 19, no. 6, pp. 716-723, 1974.
- [12] J. B. Ang, "Co2 emissions, energy consumption, and output in france," *Energy Policy*, vol. 35, no. 10, pp. 4772-4778, 2007.
- [13] R. Levine, "Finance and growth: Theory and evidence," in *Handbook of Economic Growth*, P. Aghion and S. N. Durlauf, Eds. Elsevier, 2005, vol. 1, pp. 865-934.
- [14] R. J. Barro, "Government spending in a simple model of endogenous growth," *Journal of Political Economy*, vol. 98, no. 5, pp. S103-S125, 1990.
- [15] D. A. Dickey and W. A. Fuller, "Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root," *Journal of the American Statistical Association*, vol. 74, no. 366a, pp. 427-431, 1979.
- [16] D. Kwiatkowski, P. C. B. Phillips, P. Schmidt, and Y. Shin, "Testing the null hypothesis of stationarity against the alternative of a unit root," *Journal of Econometrics*, vol. 54, no. 1-3, pp. 159-178, 1992.