Long-run relationships between education spending, human capital, innovation and economic growth in Central America: a cointegration analysis using panel data

José Rodolfo Sorto-Bueso[1]; Juan Jacobo Paredes Heller[2]
[1]Universidad Tecnológica Centroamericana UNITEC, Honduras, *jose.sorto@unitec.edu*
[2]Universidad Tecnológica Centroamericana UNITEC, Honduras, *jacobo.paredesheller@unitec.edu*

Abstract*– This study analyzes the long-term relationships between education spending, human capital, technological innovation, and economic growth in Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua, and Costa Rica during the 1992–2021 period. Using panel data techniques and an Error Correction Model (ECM), stable long-term links between these variables were identified. The results show that both educational investment and human capital are key determinants of regional economic growth, with significant effects in both the short and long term. Likewise, technological innovation makes a positive contribution, although its effects manifest primarily over longer time horizons. The evidence suggests that sustainable economic growth requires integrated strategies that coordinate investment in education, the strengthening of human capital, and the development of digital capabilities. However, the results must be interpreted in light of certain limitations, including the availability of statistical data and the need to use proxy variables to represent some key concepts. Additionally, the small sample size and the potential presence of endogeneity limit the scope of causal inferences. Consequently, future research could incorporate more disaggregated indicators and alternative econometric methodologies to deepen the understanding of the mechanisms linking education, innovation, and economic growth in Central America.

***Keywords*—Economic growth, Human capital, Education spending, Innovation, Cointegration.**

Asociaciones de largo plazo entre gasto educativo, capital humano, innovación y crecimiento económico en Centroamérica: un análisis de cointegración con datos de panel

José Rodolfo Sorto-Bueso[1]; Juan Jacobo Paredes Heller[2]
[1]Universidad Tecnológica Centroamericana UNITEC, Honduras, *jose.sorto@unitec.edu*
[2]Universidad Tecnológica Centroamericana UNITEC, Honduras, *jacobo.paredesheller@unitec.edu*

Resumen– ***Este estudio analiza las relaciones de largo plazo entre el gasto en educación, el capital humano, la innovación tecnológica y el crecimiento económico en Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua y Costa Rica durante el período 1992–2021. Mediante técnicas de datos de panel y un Modelo de Corrección de Errores (ECM), se identificó la existencia de vínculos estables de largo plazo entre estas variables. Los resultados muestran que tanto la inversión educativa como el capital humano constituyen factores determinantes del crecimiento económico regional, con efectos significativos en el corto y largo plazo. Asimismo, la innovación tecnológica presenta una contribución positiva, aunque sus efectos se manifiestan principalmente en horizontes temporales más amplios. La evidencia sugiere que el crecimiento económico sostenible requiere estrategias integradas que articulen la inversión en educación, el fortalecimiento del capital humano y el desarrollo de capacidades digitales. No obstante, los resultados deben interpretarse considerando ciertas limitaciones, entre ellas la disponibilidad de información estadística y la necesidad de emplear variables proxy para representar algunos conceptos clave. Adicionalmente, el tamaño reducido de la muestra y la posible presencia de endogeneidad restringen el alcance de las inferencias causales. En consecuencia, futuras investigaciones podrían incorporar indicadores más desagregados y metodologías econométricas alternativas para profundizar en la comprensión de los mecanismos que vinculan educación, innovación y crecimiento económico en Centroamérica.***

Keywords—Crecimiento económico, Capital humano, Gasto en educación, Innovación, Cointegración.

I. Introducción

A. Antecedentes y fundamentos

Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua y Costa Rica conforman un espacio regional con profundos vínculos históricos, económicos y geográficos. Desde el período colonial y la experiencia de la República Federal Centroamericana, estos países han compartido estructuras productivas basadas en actividades agroexportadoras, así como elevados niveles de desigualdad social [1], [2]. Aunque posteriormente siguieron trayectorias políticas diferenciadas, continúan enfrentando desafíos estructurales similares y una marcada exposición a factores externos [3]. En la actualidad, estos vínculos se reflejan en mecanismos de integración regional como el SICA y el CAFTA-DR, que promueven la cooperación institucional y comercial [4], [5]. En consecuencia, su análisis conjunto permite comprender con mayor precisión los factores que condicionan el desempeño económico de Centroamérica.

La educación ha ocupado un lugar central en la literatura económica debido a su capacidad para fortalecer el capital humano, elevar la productividad y favorecer el crecimiento económico de largo plazo. Desde la teoría del capital humano [6], [7], [8] y los modelos de crecimiento endógeno [9], [10], [11], la educación es entendida como una inversión que incrementa las capacidades productivas de los individuos y facilita la generación, difusión y aprovechamiento del conocimiento, convirtiéndose en un elemento fundamental para la innovación y el progreso tecnológico [12]. En términos generales, la evidencia empírica internacional respalda esta perspectiva al mostrar que el gasto educativo y la expansión de los sistemas de enseñanza contribuyen al aumento del ingreso per cápita y la productividad, especialmente cuando estas inversiones se sostienen en el tiempo y se desarrollan en entornos institucionales favorables [13], [14].

La literatura también señala que los efectos de la educación sobre el crecimiento económico dependen de la calidad y composición del capital humano generado. En este contexto, la educación superior desempeña un papel especialmente relevante al contribuir a la formación de profesionales altamente calificados y al fortalecimiento de capacidades científicas y tecnológicas. Diversas investigaciones muestran que la acumulación de capital humano avanzado impulsa la investigación, la innovación y la generación de externalidades positivas que trascienden los beneficios individuales de la educación [15]. Estas capacidades resultan particularmente importantes en economías con rezagos persistentes de productividad y competitividad [16].

Además de la educación, la innovación tecnológica se reconoce como un factor fundamental para el crecimiento económico. La evidencia empírica también indica que integrar las TIC con la gestión del conocimiento puede inpulsar la productividad [17], mientras que su expansión y adopción generalizada favorecen el crecimiento y el desarrollo económico[18]. No obstante, sus beneficios suelen manifestarse principalmente en el largo plazo [19]. En el caso de América Latina, diversos estudios coinciden en que los rezagos tecnológicos y de productividad continúan restringiendo el desempeño económico de la región, lo que pone de relieve la necesidad de fortalecer de manera conjunta la educación y la innovación [20].

Aunque existe abundante evidencia internacional, los resultados para América Latina son menos concluyentes y reflejan importantes diferencias entre países. Factores como la calidad educativa, la estructura productiva, las capacidades tecnológicas y la fortaleza institucional condicionan el

impacto de la educación y el capital humano sobre el crecimiento económico [21], [22], [23]. Estas diferencias adquieren especial relevancia en Centroamérica, una región caracterizada por persistentes desafíos en materia de productividad, formación de capital humano avanzado e innovación [24].

B. *Brecha de investigación, Preguntas y Objetivos*

Si bien existen investigaciones que analizan la relación entre educación, capital humano, innovación y crecimiento económico en Centroamérica [25], [26], [27], a evidencia regional sigue siendo limitada cuando estos factores se examinan conjuntamente e incorporando explícitamente la innovación tecnológica. El presente estudio contribuye a esta literatura al integrar el gasto educativo, el capital humano y la innovación tecnológica en un mismo marco empírico para analizar su relación con el crecimiento económico regional. Además, se diferencia de estudios previos mediante un enfoque de cointegración con datos de panel y un Modelo de Corrección de Errores (ECM), que permite identificar tanto los ajustes de corto plazo como las relaciones estructurales de largo plazo entre las variables analizadas. La pregunta de investigación se formula de la siguiente manera: ¿Existe evidencia de mecanismos de causalidad estadística de largo plazo entre el gasto en educación, el capital humano, la innovación y el crecimiento económico en los países de Centroamérica en el período de 1992-2021?

De la pregunta anterior se deriva el objetivo general de esta investigación: Examinar la existencia de mecanismos de causalidad estadística de largo plazo entre el gasto en educación, el capital humano, la innovación y el crecimiento económico en los países de Centroamérica en el período de 1992-2021.

C. *Descripción general del contenido*

Con el propósito de alcanzar los objetivos planteados, el artículo se estructura en cinco secciones. La primera presenta el problema de investigación, las preguntas que orientan el estudio y los objetivos propuestos. La segunda desarrolla el marco teórico y formula la hipótesis de investigación. La tercera describe la metodología empleada, incluyendo el modelo econométrico, la recopilación de datos y las técnicas de estimación. La cuarta expone y analiza los resultados obtenidos, mientras que la quinta reúne las principales conclusiones y sus implicaciones.

II. Marco conceptual e Hipótesis

A. *Marco conceptual*

En este apartado se describen las variables utilizadas y los indicadores empleados para su medición en la presente investigación.

1) PIB per cápita: Como métrica del crecimiento económico se utilizó el PIB per cápita expresado en dólares corrientes, calculado como la relación entre el producto interno bruto y la población estimada a mitad de año. Este indicador refleja el valor agregado generado por la economía y constituye una de las medidas más empleadas para evaluar el desempeño económico de los países [28], [29].

2) Ahorro ajustado: Gasto en educación: Para aproximar la inversión educativa se empleó el indicador Ahorro Ajustado: Gasto en Educación, el cual representa la porción del ahorro neto ajustado destinada a financiar gastos corrientes del sistema educativo. Este indicador incluye principalmente costos operativos, como remuneraciones del personal, y excluye inversiones de capital asociadas a infraestructura o equipamiento [29]. Siguiendo estudios previos, fue utilizado como variable proxy del gasto corriente en educación [28], [30], [31].

3) Inscripción escolar nivel terciario: El capital humano se aproximó mediante la tasa bruta de matrícula en educación superior. Este indicador mide el total de estudiantes matriculados en educación superior, independientemente de su edad, como proporción de la población correspondiente al grupo etario teórico de dicho nivel educativo [32]. Al igual que en investigaciones anteriores, la matrícula terciaria se considera una medida adecuada para capturar la acumulación de capital humano y su potencial contribución al crecimiento económico [28].

4) Suscripciones a banda ancha fija: Con el fin de aproximar el nivel de innovación se utilizó el indicador Suscripciones a banda ancha fija, que mide las suscripciones fijas de acceso de alta velocidad a Internet, tanto residenciales como de organizaciones. Este indicador incluye conexiones mediante todas las tecnologías y se excluyen las suscripciones de redes móviles celulares [33]. Tal como lo han hecho otros autores, fue utilizado como variable proxy de la innovación [34], [35].

B. *Hipótesis*

Basados en la Teoría del crecimiento endógeno [9], [10], [11] y el Teorema de Representación de Engle y Granger [36], la hipótesis se formula de la siguiente forma: Existe evidencia de relaciones dinámicas consistentes con mecanismos de causalidad estadística de largo plazo entre el gasto corriente en educación, el capital humano, la innovación y el crecimiento económico en los países de Centroamérica durante el período 1992–2021.

III. Materiales y métodos

A. *Definición del modelo*

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, con un diseño no experimental y longitudinal retrospectivo utilizando técnicas de datos de panel. Dado que las variables analizadas son no estacionarias en niveles, inicialmente se aplicaron pruebas de raíz unitaria para determinar su orden de integración. Posteriormente, se emplearon las pruebas de cointegración de Pedroni [37], [38] y Westerlund [39] con el propósito de evaluar la existencia de una relación de equilibrio de largo plazo entre el crecimiento económico, el gasto en educación, el capital humano y la

innovación tecnológica en los países de Centroamérica en el período establecido.

La relación de largo plazo se especificó mediante la siguiente ecuación cointegrante:

$$Lpib_pc_{it} = \alpha_i + \beta_1 Laho_edu_{it} + \beta_2 Por_mat_ter_{it} + \beta_3 Lsus_int_ba_{it} + u_{it} \quad \textbf{(1)}$$

Donde $Lpib_pc_{it}$ representa el logaritmo natural del PIB per cápita; $Laho_edu_{it}$ corresponde al logaritmo natural del gasto en educación; $Por_mat_ter_{it}$ representa la tasa bruta de matrícula en educación terciaria; $Lsus_int_ba_{it}$ corresponde al logaritmo natural de las suscripciones de banda ancha fija; y u_{it} representa el término de error de largo plazo.

Una vez confirmada la existencia de cointegración, los coeficientes de largo plazo se estimaron mediante el método Panel Dynamic Ordinary Least Squares (PDOLS) desarrollado por Pedroni [40]. Este procedimiento incorpora rezagos y adelantos de las variables explicativas en primeras diferencias, lo que permite mitigar problemas de endogeneidad y correlación serial, frecuentes en modelos de panel con relaciones cointegradas.

A partir de la ecuación de largo plazo se obtuvieron los residuos, los cuales fueron utilizados para construir el término de corrección de error (ECM_{it-1}). Este componente recoge las desviaciones temporales respecto al equilibrio y permite evaluar la velocidad con que las variables retornan a su trayectoria de largo plazo. Sobre esta base se estimó un Modelo de Corrección de Errores (ECM), herramienta que permite analizar de forma conjunta los ajustes de corto plazo y el proceso de convergencia hacia el equilibrio.

La especificación general del modelo ECM se expresa de la siguiente manera:

$$\Delta Lpib_pc_{it} = \alpha_i + \sum_{j=1}^{p-1} \phi_{ij}\, \Delta Lpib_pc_{it-j} + \sum_{j=0}^{q-1} \beta_{1ij}\, \Delta Laho_edu_{it-j} + \sum_{j=0}^{q-1} \beta_{2ij}\, \Delta Por_mat_ter_{it-j} + \sum_{j=0}^{q-1} \beta_{3ij}\, \Delta Lsus_int_ba_{it-j} + \lambda_i ECM_{it-1} + \varepsilon_{it} \quad \textbf{(2)}$$

En esta especificación, los coeficientes asociados a las variables expresadas en primeras diferencias reflejan los efectos de corto plazo sobre la variable dependiente. Por su parte, el parámetro λ_i mide la velocidad con la que el sistema corrige los desequilibrios y retorna a su trayectoria de largo plazo. Cuando este coeficiente es negativo y estadísticamente significativo, indica que las desviaciones observadas son transitorias y tienden a corregirse con el tiempo, proporcionando evidencia de un proceso de convergencia hacia una relación de equilibrio estable entre las variables analizadas [36], [39].

Derivado de la ecuación **(2)** , ECM_{it-1} se calcula como:

$$ECM_{it-1} = Lpib_pc_{it-1} - \beta_1 Laho_edu_{it-1} - \beta_2 Por_mat_ter_{it-1} - \beta_3 Lsus_int_ba_{it-1} - \alpha_i \quad \textbf{(3)}$$

B. Tamaño de la muestra

Para esta investigación se configuró un panel para cinco países: Guatemala, El Salvador, Guatemala, Honduras, Nicaragua y Costa Rica, las series de tiempo para las variables comienzan en 1992 y finaliza en 2021, equivalente a 30 años. La variable asociada al PIB per cápita (*Lpib_pc*), Ahorro ajustado gasto en educación (*Laho_edu*) y Suscripciones de internet de banda ancha (*Lsus_int_ba*) están completas para todos los países. La variable Porcentaje de Matricula en educación terciaria (*Por_mat_ter*) que contenía datos faltantes en las bases de datos principales se completó mediante imputación [41], [42].

C. Procedimiento de recopilación de datos

Los datos fueron obtenidos principalmente a través de bases de datos públicas como el Banco Mundial y la UNESCO, así como repositorios nacionales. Debido a la ausencia de información completa sobre matrícula en educación superior para algunos países y años del período de estudio, fue necesario reconstruir parte de la serie mediante técnicas de imputación. Para ello se emplearon procedimientos de regresión lineal e interpolación apoyados en una variable auxiliar de matriculación nacional que mostró una correlación elevada y estadísticamente significativa con la variable de interés. La estimación de los valores faltantes se realizó siguiendo la metodología propuesta y validada por Sorto-Bueso et al. [24], quienes verificaron la consistencia de las imputaciones mediante pruebas de sensibilidad y análisis de robustez basados en fuentes oficiales y repositorios nacionales. Este procedimiento permitió ampliar la cobertura temporal de los datos sin comprometer la coherencia estadística de la serie empleada en el análisis econométrico. Los repositorios nacionales y fuentes secundarias consultados fueron: el Instituto Nacional de Estadística INE de Guatemala; el Instituto Nacional de Información para el Desarrollo INIDE de Nicaragua; el informe Comportamiento de la variable género en la educación superior en Nicaragua en UNESDOC; el Consejo Nacional de Rectores CONARE en Costa Rica y el artículo de Tobar Piril [43]. Las tablas se descargaron en formato Excel y se organizaron por país y por variable, posteriormente se importaron y procesaron en STATA 14.

D. Aproximación analítica

El análisis de los datos comenzó con la transformación logarítmica de las variables PIB per cápita, Ahorro ajustado: Gasto en educación y Suscripciones de internet de banda ancha, esto ha permitido prescindir de las unidades y suavizar las variaciones interanuales [28]. Una vez definido el panel se calculó la estadística descriptiva, se evaluó la correlación y colinealidad de las variables, se corrieron pruebas de Wald, Wooldridge y la de Breusch-Pagan LM para evaluar la homocedasticidad, la no autocorrelación del modelo y la dependencia de corte trasversal respectivamente. Lo siguiente fue aplicar pruebas de raíz unitaria para determinar el orden de integración de las series. Para ello, se empleó la prueba de Im, Pesaran y Shin (IPS) [44] y, considerando la

dependencia transversal identificada entre los países, se complementó el análisis con la prueba de segunda generación CADF/CIPS de Pesaran [45], aplicadas tanto a las variables en niveles como en primeras diferencias.

Una vez conocido el estado de los supuestos, se corrió la prueba de Pedroni con el objetivo de determinar la existencia de una relación de cointegración a largo plazo entre variables del modelo, es decir, evaluar si las variables con tendencias individuales (no estacionarias) se mueven juntas en el tiempo y mantienen una relación de equilibrio estable. Ya que la prueba de Pedroni suele ser menos potente en paneles pequeños (N = 5 en este caso) [46], se utilizó como contraste la prueba de Westerlund dado su flexibilidad y porque suele ser mucho más robusta frente a la dependencia transversal [39].

El siguiente paso fue el cálculo de la ecuación cointegrante de largo plazo usando un modelo de efectos fijos. Posteriormente, los residuos obtenidos se utilizaron para construir el término de corrección de error (ECM), siguiendo la metodología de Engle y Granger [36]. Incorporado en el modelo final, la ecuación en primeras diferencias, este término permitió medir la velocidad con la que las economías retornan a su trayectoria de equilibrio de largo plazo tras experimentar desviaciones o perturbaciones temporales. Los coeficientes de la ecuación se estimaron utilizando un modelo de efectos fijos con errores estándar robustos de Driscoll-Kraay que es robusto frente a heterocedasticidad, correlación temporal y dependencia de corte transversal [47].

IV. Resultados y discusión

A. Resultados

A continuación, la Tabla 1 muestra las estadísticas descriptivas del panel formado por los cinco países centroamericanos y las series de tiempo anuales desde 1992 a 2021 para las variables *Lpib_pc, Laho_edu, Por_mat_ter* y *Lsus_int_ba.*

TABLA I
ESTADÍSTICAS DESCRIPTIVAS DEL PANEL

Variable		Media	Des. Stan.	Min	Max	Observ.
Lpib_pc	overall	7.7595	0.7132	5.9773	9.4638	N = 150
	between		0.6135	7.1478	8.7165	n = 5
	within		0.4533	6.5889	8.5068	T = 30
Laho_edu	overall	20.1130	1.0062	17.6751	17.6751	N = 150
	between		0.6705	19.1633	20.9915	n = 5
	within		0.8065	18.4216	21.3796	T = 30
Por_mat_ter	overall	21.5912	11.5517	7.7101	61.5639	N = 150
	between		10.9259	13.8450	39.7510	n = 5
	within		6.1075	7.8334	43.4040	T = 30
Lsus_int_ba	overall	7.0741	5.9241	0.0000	13.8738	N = 150
	between		1.4040	4.6790	8.2144	n = 5
	within		5.7886	-1.1403	15.3455	T = 30

La Tabla 1 muestra una elevada dispersión en las variables de matrícula en educación superior y suscripciones de internet de banda ancha. En el primer caso, esta variabilidad responde principalmente a las diferencias existentes entre países. En el segundo, refleja la adopción desigual de la banda ancha en Centroamérica, cuya implementación ocurrió en distintos momentos: Nicaragua registró suscripciones desde 1999, Costa Rica en 2001, El Salvador en 2002, Guatemala en 2004 y Honduras hasta 2010. Asimismo, debe considerarse que esta variable fue transformada mediante logaritmos, razón por la cual el valor mínimo dentro del panel presenta valores negativos, equivalentes a 0.3197 en su escala original.

La Tabla 2 muestra los resultados de la prueba de multicolinealidad [48], el Factor de Inflación de la viaraza (VIF) es menor que 5 y la tolerancia (1/VIF) es mayor a 0.2 para todas las variables independiente. Esta condición indica un bajo riesgo de multicolinealidad para el modelo y su idoneidad para el análisis de datos de panel [49].

TABLA 2
FACTOR DE INFLACIÓN DE VARIANZA

Variable	VIF	1/VIF
Laho_edu	3.17	0.3151
Por_mat_ter	2.15	0.4649
Lsus_int_ba	1.94	0.5163
Mean VIF	2.42	

La Tabla 3 muestra los resultados de las pruebas se supuestos, en primer lugar la Prueba de Wald modificada para heterocedasticidad grupal reportó un Chi^2 de 473.24 y un valor-p menor al 1%, violando así el supuesto de homocedasticidad [50]. En segundo lugar la prueba de Wooldridge reportó un F de 77.92 y un valor-p menor al 1% probando así el supuesto de autocorrelación de primer orden [48]. Finalmente, la prueba de Breusch-Pagan del Multiplicador de Lagrange reporta un Chi^2 de 26.015 y un valor-p menor al 1% lo que indica la presencia de dependencia trasversal entre países [51].

TABLA 3
RESULTADO DE LAS PRUEBAS DE SUPUESTOS

Prueba	Chi^2	F(1,4)	p-valor	Condición
Wald Modificado	473.24	---	0.0000	Heteroscedasticidad
Wooldridge	----	77.92	0.0009	Correlación 1er-ord.
Breusch-Pagan LM	26.015	----	0.0037	Dependencia transv.

Estos resultados indican que la aplicación de estimadores tradicionales de efectos fijos o aleatorios podría generar errores estándar inconsistentes y, por tanto, inferencias estadísticas poco confiables [52]. La presencia de heterocedasticidad y autocorrelación revela diferencias estructurales entre los países y una persistencia temporal propia de las series macroeconómicas, donde los efectos tienden a prolongarse a lo largo del tiempo. Asimismo, la dependencia transversal sugiere que las economías centroamericanas están estrechamente interrelacionadas, de modo que los choques externos o regionales pueden afectar simultáneamente a varios países. Ante estas condiciones, resulta necesario emplear estimadores robustos como Driscoll-Kraay, capaces de corregir estos problemas y mejorar la validez de la inferencia econométrica [24], [47].

La verificación de la estacionariedad constituye un requisito esencial en el análisis de series de tiempo. Para determinar el orden de integración de las variables se aplicaron las pruebas de raíz unitaria de Im, Pesaran y Shin (IPS) [44] y Pesaran CADF/CIPS [45], cuyos resultados se presentan en la Tabla 4. La evidencia indica que las variables son estacionarias en primeras diferencias, aunque los resultados en niveles difieren entre pruebas. La prueba CADF/CIPS incorpora la dependencia transversal identificada entre los países, proporcionando un contraste más robusto. De forma conjunta, estos resultados respaldan la aplicación de técnicas de cointegración para evaluar las relaciones de largo plazo [36].

TABLA 4
RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE RAÍZ UNITARIA

Variable	IPC (1era generación)				IPC/CIPS (2da generación)			
	Nivel		1era Diferencias		Nivel		1era Diferencias	
	Z(t)	p-val	Z(t)	p-val	Z(t)	p-val	Z(t)	p-val
Lpib_pc	0.5321	0.702	-6.107	0.000	-6.114	0.000	-5.651	0.000
Laho_edu	0.5722	0.716	-6.346	0.000	0.146	0.558	-4.522	0.000
Por_mat_ter	2.4937	0.993	-7.044	0.000	-1.782	0.037	-5.006	0.000
Lsus_int_ba	1.6132	0.946	-5.910	0.000	-2.496	0.006	-4.724	0.000

Una vez confirmado la condición de estacionalidad en primera diferencia de todas las variables, se utiliza la Prueba de Pedroni para de determinar si existe una relación de cointegración a largo plazo entre variables del modelo. Las Tablas 5 y 6 exponen los resultados de la Prueba de Pedroni, los estadísticos *t* y *adf* son mayores que -1.96, con lo cual, no puede rechazarse Ho, es decir, no hay suficiente evidencia estadística de que existe cointegración estructural o bien la cointegración es heterogénea [37].

TABLA 5
ESTADÍSTICOS DE LA PRUEBA DE PEDRONI

Test Stats	Panel	Group
v	-0.923	-
rho	1.181	1.761
t	-0.567	-0.660
adf	0.784	1.689

A pesar del resultado de la prueba, los coeficientes de largo plazo son positivos y significativos (t-stat > 1.96), el asociado a la variable *Pro_mat_ter* se encuentra en el límite [38].

TABLA 6
ESTIMADORES DE LARGO PLAZO DE PEDRONI (PDOLS)

Variables	Beta	t-stat
Laho_edu	0.083	8.708
Por_mat_ter	0.006	1.903
Lsus_int_ba	0.002	5.296

Los resultados de Pedroni fueron contrastados mediante la Westerlund [39], cuya formulación basada en corrección de errores resulta pertinente para el panel (N=5, T=30). Además, su implementación bootstrap permite considerar la dependencia transversal y mejorar la inferencia en muestras pequeñas. La Tabla 7 presenta los resultados obtenidos.

TABLA 7
RESULTADOS DE LA PRUEBA DE COINTEGRACIÓN DE WESTERLUND

Estadístico	Valor	Z	p-valor	p-valor Robusto
Gt	-2.404	-1.517	0.065	0.060
Ga	-12.830	-1.797	0.036	0.000
Pt	-5.823	-2.196	0.014	0.045
Pa	-9.217	-1.752	0.040	0.025

Ya que el valor-p < 0.10 y 0.05 para Gt y Ga respectivamente, se rechaza Ho, esto es, existe cointegración (al menos en algunos países). Además, dado que el valor-p < 0.05 para Pt y Pa, también se rechaza Ho lo que implica la existencia de cointegración en todo el panel.

En este punto, se puede afirmar que existe una relación estructural o de equilibrio de largo plazo entre las variables [39]. La estimación de este equilibrio está dado por el vector de cointegración PDOLS de Pedroni. Todas las elasticidades son positivas. El siguiente paso ha sido estimar el mecanismo de ajuste de largo plazo usando el Modelo de Corrección de Errores (ECM) [36]. Este enfoque permite estimar tanto la velocidad de ajuste hacia el equilibrio de largo plazo como los efectos de corto plazo de las variables explicativas. Las pruebas diagnósticas previas identificaron heterocedasticidad, autocorrelación serial y dependencia transversal entre los países analizados, condiciones que pueden comprometer la validez de la inferencia estadística. Para corregir estos problemas, se estimó un modelo de efectos fijos con errores estándar robustos de Driscoll-Kraay, metodología adecuada para paneles macroeconómicos con economías interrelacionadas y capaz de proporcionar inferencias consistentes frente a estas fuentes de dependencia [47]. Los resultados se presentan en la Tabla 8.

TABLA 8
RESULTADOS DEL MODELO ROBUSTO CON DRISCOL-KRAAY

DLpib_pc	Coef.	Err. Std.	t	P>|t|	[95% Inter. Conf.]	
L1_DLpib_pc	0.0840	0.0581	1.4500	0.1590	-0.0351	0.2031
L1_ecm	**-0.5906**	**0.1692**	**-3.4900**	**0.0020**	**-0.9378**	**-0.2435**
DLaho_edu	0.2194	0.0631	3.4800	0.0020	0.0901	0.3488
DPor_mat_ter	0.0049	0.0017	2.9300	0.0070	0.0015	0.0084
DLsus_int_ba	0.0007	0.0018	0.3900	0.6960	-0.0030	0.0044
cons	0.0279	0.0101	2.7600	0.0100	0.0072	0.0487
Prob > F	0.0003					
R^2	0.4179					

L1_ecm es negativo y significativo, por tanto, puede afirmarse que existe cointegración, al menos en algunos países [36]. El sistema corrige el 59% del desequilibrio cada año y por tanto se puede afirmar que existe una relación de causalidad estadística de largo plazo entre la educación, el capital humano, la innovación tecnológica y el crecimiento

económico regional. Siguiendo a Granger [53], la significancia de este mecanismo de ajuste descarta una asociación espuria y sugiere que los desequilibrios acumulados en períodos anteriores influyen sistemáticamente en la trayectoria futura del crecimiento económico. Los coeficientes en *DLaho_edu* y *DPor_mat_ter* son positivos y significativos. El coeficiente de *DLsus_int_ba* es positivo pero no significativo. Estos resultado confirman un efecto contemporaneo condicionado al equilibrio de largo plazo.

TABLA 9
RESULTADOS DEL MODELO PARA EL CORTO Y LARGO PLAZO

Variable	Largo plazo (PDOLS)	Corto plazo (ECM-DK)	Multiplicador Acululado LP (ECM)
Educación (*Laho_edu*)	0.0829***	0.2194**	0.3717
Capital humano (*Por_mat_ter*)	0.0063*	0.0049**	0.0084
Innovación(*Lsus_int_ba*)	0.0021***	0.0007	0.0012
ECM_{t-1}	---	-0.5906**	

*Nota: *p<0.1 ** p<0.05 *** p<0.001*

En el ECM, el coeficiente *L1_ecm* representa la velocidad de ajuste hacia el equilibrio, mientras que los coeficientes de las variables diferenciadas capturan los efectos de corto plazo. Siguiendo la formulación de los modelos de corrección de errores [54], los multiplicadores acumulados se obtienen dividiendo estos coeficientes entre el valor absoluto del coeficiente de ajuste. Estos representan el efecto acumulado que se transmite mediante el proceso de ajuste y se reportan como complemento de los coeficientes de largo plazo estimados mediante PDOLS. La Tabla 9 integra los resultados del modelo.

Un aumento de 1% en el gasto educativo se asocia con un aumento acumulado de aproximadamente 0.37% en el PIB per cápita a través del mecanismo de ajuste. Un aumento de 1 punto porcentual en la matrícula terciaria se asocia con un aumento acumulado de aproximadamente 0.84% en el PIB per cápita (variable a nivel). El efecto acumulado de la innovación resulta marginal. Aunque las suscripciones de internet de banda ancha muestran un efecto acumulado positivo de largo plazo, su magnitud es reducida y no se encontró evidencia estadística significativa de efectos contemporáneos de corto plazo.

En referencia a la hipótesis de investigación y de acuerdo con la evidencia empírica, es posible afirmar que existen relaciones dinámicas consistentes con mecanismos de causalidad estadística de largo plazo (en el sentido de Granger) entre el gasto corriente en educación, el capital humano, la innovación y el crecimiento económico en los países de Centroamérica durante el período 1992–2021.

B. Discusión

Los resultados obtenidos demuestran de manera empírica y coherente que la educación, el capital humano y el desarrollo tecnológico son factores estructurales clave del crecimiento económico en los países de Centroamérica. En términos generales, los hallazgos son congruentes con la Teoría del Crecimiento Endógeno [9], [10].

La estimación de largo plazo usando PDOLS mostró que el gasto en educación tiene un efecto positivo y estadísticamente significativo sobre el PIB per cápita. Un incremento de 1% en el gasto educativo se asocia con un aumento aproximado de 0.37% en el ingreso per cápita de largo plazo. Este incremento es menor al incremento 0.50% que encontró Baldacci et al. [55]. Como sugiere Romer [11], la cualificación de la fuerza laboral actúa como un conductor de la eficiencia agregada, mientras que Barro y Sala-i-Martin [56] enfatizan que el fortalecimiento de la productividad laboral es el mecanismo fundamental para garantizar la sostenibilidad del crecimiento. Este comportamiento denota la naturaleza acumulativa y la histéresis positiva del capital humano.

Desde una perspectiva económica, este hallazgo resulta especialmente relevante para Centroamérica, una región que históricamente ha enfrentado bajos niveles de inversión educativa, limitada cobertura de educación superior y persistentes rezagos en productividad [24], [57]. No obstante, la evidencia también muestra diferencias importantes entre países en su capacidad para convertir la inversión en educación en crecimiento económico. En Honduras, por ejemplo, Villela & Paredes [27] no encontraron una relación significativa entre gasto educativo, capital humano y crecimiento, reflejando las restricciones estructurales presentes en algunas economías de la región. Sin embargo, los resultados de esta investigación sugieren que, al considerar una perspectiva regional y horizontes temporales más amplios, la educación sí contribuye positivamente al crecimiento económico [14]. Esto indica que sus beneficios no se manifiestan de manera homogénea ni inmediata, sino que emergen gradualmente a través de procesos acumulativos de formación de capital humano.

En cuanto al capital humano, la variable asociada a la matrícula en educación superior presentó un efecto positivo sobre el crecimiento económico, tanto en el modelo ECM como en la estimación de largo plazo. Si bien en el modelo PDOLS el nivel de significancia estadística fue más moderado, el signo positivo del coeficiente y la coherencia económica del resultado respaldan la hipótesis de que una mayor formación del capital humano contribuye a elevar la productividad y facilita los procesos de adopción tecnológica. Estos hallazgos mantienen coherencia con lo planteado por Lucas [9]. De manera similar, Mankiw et al [58] demostraron empíricamente que el capital humano representa un componente fundamental para explicar las diferencias en las trayectorias de crecimiento entre países.

Los multiplicadores acumulados muestran que el capital humano constituye uno de los determinantes con mayor incidencia sobre el crecimiento económico de largo plazo. Los resultados indican que un incremento de un punto porcentual en la matrícula de educación superior se relaciona con un aumento acumulado cercano al 0.84% en el PIB per cápita. A

modo ilustrativo, en una economía como la de El Salvador, donde el PIB per cápita supera los US$5,000, este efecto se traduciría en aproximadamente US$45 adicionales por habitante. Para una población cercana a 6.3 millones de personas, ello implicaría un incremento agregado de producción de alrededor de US$280 millones en el largo plazo. Si bien esta cifra constituye una aproximación basada en el efecto promedio estimado para la muestra, permite apreciar con mayor claridad el potencial económico asociado a la expansión sostenida de la educación superior y al fortalecimiento del capital humano. Si bien sus efectos no se materializan de forma inmediata, la formación de capital humano avanzado contribuye progresivamente a elevar la productividad, acelerar la adopción de nuevas tecnologías y fortalecer la competitividad de las economías. [59]. Desde la perspectiva de la política pública, los resultados indican que ampliar la cobertura de la educación superior constituye una condición necesaria, pero no suficiente. Para que sus beneficios se traduzcan en un crecimiento económico sostenido, resulta fundamental fortalecer la calidad y pertinencia de la formación universitaria. Desde una perspectiva estructural, los resultados indican que Centroamérica aún enfrenta limitaciones institucionales, productivas y tecnológicas que restringen los beneficios de la expansión de la educación superior. Por ello, fortalecer el capital humano requiere una mayor articulación entre universidades, sistemas de innovación y sectores productivos estratégicos.

Los resultados relacionados con la innovación tecnológica, aproximada mediante las suscripciones de banda ancha fija, indican que sus efectos sobre el crecimiento económico en Centroamérica se concentran principalmente en el largo plazo. Aunque el modelo ECM no evidenció impactos estadísticamente significativos en el corto plazo, la estimación mediante PDOLS reveló una relación positiva y significativa, coherente con la literatura que sostiene que los beneficios derivados de la digitalización emergen de manera progresiva [60] [61]. En consecuencia, la evidencia sugiere que el potencial económico de la digitalización se maximiza cuando forma parte de una estrategia más amplia de fortalecimiento de capacidades y desarrollo tecnológico [62].

Uno de los resultados más relevantes de la investigación se encuentra en el término de corrección de error (ECM). El coeficiente negativo y estadísticamente significativo proporciona evidencia de una relación estable de largo plazo entre el crecimiento económico, la educación, el capital humano y la innovación tecnológica [36]. Específicamente, el valor estimado (-0.59) sugiere que aproximadamente el 59% de las desviaciones respecto a la trayectoria de equilibrio se corrige en el período siguiente, reflejando una velocidad de ajuste considerablemente elevada. Este comportamiento indica que el crecimiento económico de Centroamérica muestra una capacidad de reajuste sostenida hacia niveles compatibles con la acumulación de capital humano, la inversión educativa y el desarrollo tecnológico. Esta evidencia coincide con investigaciones previas que subrayan el papel de las capacidades productivas, educativas y tecnológicas como elementos centrales en los procesos de convergencia económica [19], [63]. Asimismo, pone de relieve la importancia de mantener políticas consistentes en estos ámbitos para favorecer trayectorias de crecimiento más sostenidas en la región.

Los resultados permiten identificar una secuencia estructural en el proceso de crecimiento económico regional. En una primera etapa, la educación emerge como el principal impulsor del desarrollo; posteriormente, la acumulación de capital humano contribuye a elevar la productividad y facilita la adopción de nuevas tecnologías; finalmente, la innovación tecnológica genera impactos más notorios en horizontes de largo plazo. Este patrón es consistente con los planteamientos de Aghion y Howitt [64], quienes sostienen que la innovación depende de la existencia de capacidades humanas y tecnológicas previas, así como de un entorno institucional que favorezca su aprovechamiento efectivo.

Si bien los resultados obtenidos son consistentes, su interpretación debe considerar algunas limitaciones. La principal se relaciona con la disponibilidad y calidad de la información estadística para los países centroamericanos. En particular, la ausencia de series históricas completas sobre gasto educativo obligó a emplear el indicador de Ahorro Ajustado: Gasto en Educación como variable proxy. Aunque esta medida permite aproximar la inversión educativa, no diferencia entre niveles de enseñanza, por lo que los efectos estimados podrían variar ante la disponibilidad de información más detallada y homogénea para todos los países analizados [24]. De forma similar, el capital humano y la innovación tecnológica fueron aproximados mediante la matrícula en educación superior y las suscripciones de banda ancha fija. Aunque ambos indicadores son ampliamente utilizados en la literatura, no reflejan plenamente la complejidad de estos fenómenos. La incorporación de variables como graduados universitarios, inversión en investigación y desarrollo (I+D), publicaciones científicas, número de investigadores o patentes habría permitido una evaluación más completa de los vínculos entre conocimiento, innovación y crecimiento económico, sin embargo, estas series de tiempo están bastante incompletas para Centroamérica. En consecuencia, los resultados vinculados a la variable de innovación deben entenderse, principalmente, como una aproximación al efecto de la conectividad digital y de los procesos de difusión tecnológica sobre el crecimiento económico, más que como una medida exhaustiva de la capacidad de innovación o del desempeño tecnológico global de las economías consideradas en el estudio. Otra limitación a considerar corresponde a la imputación de datos de matrícula superior. No obstante, las pruebas de sensibilidad y robustez reportadas en estudios previos [24] evidencian estabilidad en el signo, magnitud y significancia de los principales coeficientes al comparar estimaciones con datos imputados y observados. Esto fortalece

la confiabilidad de las inferencias y reduce la posibilidad de que la imputación determine los hallazgos.

Por otra parte, los resultados deben entenderse como asociaciones estadísticas robustas y no como evidencia causal definitiva. El tamaño reducido del panel (N = 5), junto con posibles problemas de endogeneidad, limita la capacidad para establecer relaciones causales concluyentes [65]. Además, el modelo no captura explícitamente determinados choques comunes ni algunas características institucionales y productivas propias de cada economía.

En este contexto, futuras investigaciones podrían incorporar indicadores más desagregados y metodologías econométricas más flexibles, con el propósito de profundizar en los mecanismos mediante los cuales la educación, el capital humano y la innovación tecnológica inciden sobre el crecimiento económico en Centroamérica.

Aun considerando las limitaciones señaladas, esta investigación ofrece evidencia valiosa para comprender los factores que condicionan el crecimiento económico en Centroamérica. Los hallazgos muestran que el desarrollo regional no puede explicarse únicamente por la acumulación de capital físico, sino también por elementos vinculados al conocimiento, la educación y la innovación tecnológica [62], [66]. Desde esta perspectiva, las políticas públicas requieren un enfoque integral orientado al largo plazo. La evidencia obtenida indica que la mejora de los sistemas educativos, la consolidación de capital humano avanzado y el fortalecimiento de la infraestructura tecnológica deben desarrollarse de manera articulada para favorecer trayectorias de crecimiento más sostenidas, resilientes y competitivas [19], [67].

V. Conclusiones

Los resultados de la investigación aportan evidencia consistente sobre la existencia de relaciones de largo plazo entre el gasto en educación, el capital humano, la innovación tecnológica y el crecimiento económico en Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua y Costa Rica durante el período 1992–2021. En conjunto, los hallazgos respaldan la idea de que el desarrollo económico de la región depende no solo de la acumulación de capital físico, sino también de la capacidad de generar, absorber y aprovechar conocimiento a través de la educación, la formación de capital humano y la innovación.

En primer lugar, la educación emerge como uno de los principales determinantes del crecimiento económico regional. A pesar de las diferencias existentes entre países, Centroamérica continúa enfrentando desafíos comunes asociados a niveles relativamente bajos de inversión educativa, una cobertura limitada de la educación superior y persistentes rezagos de productividad. En este contexto, la educación trasciende su dimensión social y se consolida como un factor estratégico para fortalecer la capacidad productiva y la competitividad. Por ello, resulta pertinente promover políticas coordinadas que permitan incrementar gradualmente la inversión educativa y garantizar la sostenibilidad de su financiamiento, en consonancia con las recomendaciones internacionales [68].

En segundo lugar, el capital humano, aproximado mediante la matrícula en educación superior, mostró efectos positivos tanto en el corto como en el largo plazo. La evidencia sugiere que la acumulación de capacidades avanzadas favorece la productividad, facilita la adopción tecnológica y fortalece el crecimiento económico de manera persistente. No obstante, ampliar la cobertura universitaria por sí sola no garantiza estos resultados. Se requieren políticas que promuevan la permanencia estudiantil, fortalezcan la calidad de la formación y fomenten áreas estratégicas como ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas, alineando la educación superior con las necesidades productivas de la región [32], [69].

Respecto a la innovación tecnológica, los resultados indican que sus efectos se materializan principalmente en horizontes de largo plazo. Aunque la expansión de la banda ancha fija no mostró impactos significativos en el corto plazo, sí presentó una contribución positiva y sostenida sobre el crecimiento económico. Esto sugiere que los beneficios de la digitalización dependen de procesos graduales de adopción tecnológica y de la existencia de capacidades complementarias para transformar la conectividad en ganancias de productividad [70]. En consecuencia, las políticas de expansión digital deberían ampliar la conectividad de banda ancha, priorizando zonas con menor cobertura y articulando inversiones en infraestructura digital con programas de formación de habilidades digitales. Asimismo, la coordinación regional puede favorecer infraestructura compartida y servicios digitales interoperables, complementando estas acciones con iniciativas de innovación y fortalecimiento institucional para transformar la conectividad en ganancias sostenidas de productividad [71].

Asimismo, la significancia del término de corrección de error confirma la existencia de una relación de equilibrio de largo plazo entre las variables analizadas, evidenciando que las economías de la región tienden a converger hacia sus fundamentos estructurales después de perturbaciones temporales. Este resultado refuerza la importancia de mantener estrategias sostenidas de inversión en educación, formación de capacidades e infraestructura tecnológica.

Finalmente, futuras investigaciones podrían ampliar este análisis incorporando variables relacionadas con la calidad educativa, la inversión en investigación y desarrollo (I+D), la calidad institucional y la apertura comercial. También sería pertinente explorar posibles relaciones no lineales y contrastar la robustez de los resultados mediante estimadores alternativos para paneles heterogéneos, así como complementar la evidencia macroeconómica con estudios microeconómicos que permitan comprender con mayor profundidad los mecanismos que vinculan educación, innovación, productividad y bienestar.

REFERENCIAS

[1] V. Bulmer-Thomas, *The Economic History of Latin America since Independence*, 2nd ed. in Cambridge Latin American Studies. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. doi: 10.1017/CBO9780511817397.

[2] R. L. Woodward, *Central America: A Nation Divided*, Third Revised Edition, Third Revised Edition. in Latin American Histories. Oxford, New York: Oxford University Press, 1999.

[3] H. Pérez Brignoli, *Breve historia de Centroamérica*, 5th ed. Madrid: Alianza, 2018. Accessed: Jun. 19, 2026. [Online]. Available: http://www.alianzaeditorial.es/libro/historia/breve-historia-de-centroamerica-hector-perez-brignoli-9788491811923/

[4] CEPAL, *The Inefficiency of Inequality*. in LC/SES.37/3-P. ECLAC, 2018. Accessed: Oct. 21, 2025. [Online]. Available: https://www.cepal.org/en/publications/43443-inefficiency-inequality

[5] J. R. Rojas Rodríguez and X. Matschke, "The CAFTA-DR Free Trade Agreement — Analyzing its effects in a modern gravity framework," *Int. Econ. Econ. Policy*, vol. 20, no. 1, pp. 27–93, Feb. 2023, doi: 10.1007/s10368-022-00551-8.

[6] G. S. Becker, *Human Capital A Theoretical and Empirical Analysis, with Special Reference to Education*, 3rd ed. University of Chicago Press, 1993. doi: 10.7208/chicago/9780226041223.001.0001.

[7] J. Mincer, *Schooling, Experience, and Earnings*. in NBER Books. National Bureau of Economic Research, Inc, 1974. Accessed: Jun. 19, 2026. [Online]. Available: https://EconPapers.repec.org/RePEc:nbr:nberbk:minc74-1

[8] T. Schultz, "Investment in Human Capital," *Am. Econ. Rev.*, vol. 51, no. 1, pp. 1–17, Mar. 1961.

[9] R. E. Lucas, "On the mechanics of economic development," *J. Monet. Econ.*, vol. 22, no. 1, pp. 3–42, Jul. 1988, doi: 10.1016/0304-3932(88)90168-7.

[10] P. M. Romer, "Increasing Returns and Long-run Growth," *J. Polit. Econ.*, vol. 94, no. 5, pp. 1002–1037, Oct. 1986, doi: 10.1086/261420.

[11] P. M. Romer, "Endogenous Technological Change," *J. Polit. Econ.*, vol. 98, no. 5, pp. S71–S102, 1990.

[12] M. Grazzi and J. Jung, "Information and Communication Technologies, Innovation, and Productivity: Evidence from Firms in Latin America and the Caribbean," in *Firm Innovation and Productivity in Latin America and the Caribbean: The Engine of Economic Development*, Inter-American Development Bank, M. Grazzi, and C. Pietrobelli, Eds., New York: Palgrave Macmillan US, 2016, pp. 103–135. doi: 10.1057/978-1-349-58151-1_4.

[13] C. Diebolt and R. Hippe, "The long-run impact of human capital on innovation and economic development in the regions of Europe," *Appl. Econ.*, vol. 51, no. 5, pp. 542–563, Jan. 2019, doi: 10.1080/00036846.2018.1495820.

[14] U. B. Ishchy, "The Role of Education on Economic Growth: Evidence from Turkey," *Int. Econ. J.*, vol. 34, no. 2, pp. 347–369, Apr. 2020, doi: 10.1080/10168737.2019.1689284.

[15] A. Baldanzi, A. Bucci, and K. Prettner, "CHILDREN'S HEALTH, HUMAN CAPITAL ACCUMULATION, AND R&D-BASED ECONOMIC GROWTH," *Macroecon. Dyn.*, vol. 25, no. 3, pp. 651–668, Apr. 2021, doi: 10.1017/S136510051900035X.

[16] M. M. A. Mohamed, P. Liu, and G. Nie, "Causality between Technological Innovation and Economic Growth: Evidence from the Economies of Developing Countries," *Sustainability*, vol. 14, no. 6, p. 3586, Jan. 2022, doi: 10.3390/su14063586.

[17] E. D. Chavez-Ramirez, D. M. Anticona Valderrama, M. V. Risco Sernaque, L. Rojas Delgado, and J. J. Caballero-Cantu, "Gestión del conocimiento y las TIC en la productividad laboral de funcionarios del sector público del Perú," 2023, Accessed: Sep. 13, 2026. [Online]. Available: https://repositorio.autonoma.edu.pe/item/6c728b2d-a604-4624-8029-ee771f1def74

[18] C. S. Saba, N. Ngepah, and N. M. Odhiambo, "Information and Communication Technology (ICT), Growth and Development in Developing Regions: Evidence from a Comparative Analysis and a New Approach," *J. Knowl. Econ.*, vol. 15, no. 3, pp. 14700–14748, Sep. 2024, doi: 10.1007/s13132-023-01571-8.

[19] M. F. Carillo, "Human capital composition and long-run economic growth," *Econ. Model.*, vol. 137, p. 106760, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.econmod.2024.106760.

[20] C. Daude, "Innovation, Productivity and Economic Development in Latin America and the Caribbean," vol. 288, Feb. 2010, doi: 10.1787/5KMLCZ254421-EN.

[21] A. Aali and F. Vanegas, "Procesos de Innovación Tecnológica y Crecimiento Económico en América Latina," *Rev. Mex. Econ. Finanz. Nueva Época REMEF*, vol. 11, no. 2, pp. 77–89, May 2017, doi: 10.21919/remef.v11i2.87.

[22] Ó. H. Cerquera Losada, M. de los A. Clavijo Tovar, C. Y. Pérez Peña, Ó. H. Cerquera Losada, M. de los A. Clavijo Tovar, and C. Y. Pérez Peña, "Capital humano y crecimiento económico: evidencia empírica para Suramérica," *Apunt. Cenes*, vol. 41, no. 73, pp. 145–169, 2022, doi: 10.19053/01203053.V41.N73.2022.13679.

[23] S. Pinzón and E. Rodríguez-Crespo, "Impacto del desempeño innovador sobre el crecimiento económico para América Latina," *Rev. Económica*, vol. 12, no. 1, pp. 87–101, Jan. 2024, doi: 10.54753/rve.v12i1.2042.

[24] J. R. Sorto-Bueso, J. J. Paredes Heller, and R. H. Villela Morales, "Spending on Education, Human Capital, and Economic Growth in Central America: A Panel Data Analysis with Driscoll-Kraay Standard Errors," *Economies*, vol. 14, no. 1, p. 28, Jan. 2026, doi: 10.3390/economies14010028.

[25] C. G. A. Flores, "Contribución de las Tecnologías de Información y Comunicación (TIC) al crecimiento económico en El Salvador," *Real. Reflexión*, no. 58, pp. 84–111, Dec. 2023, doi: 10.5377/ryr.v1i58.17398.

[26] J. Loening, B. B. Rao, and R. Singh, "Effects of education on economic growth:Evidence from Guatemala," *Munich Pers. RePEc Arch.*, Jul. 2010, [Online]. Available: https://mpra.ub.uni-muenchen.de/23665/

[27] R. Villela and J. J. Paredes, "Empirical Analysis on Public Expenditure for Education, Human Capital and Economic Growth: Evidence from Honduras," *Economies*, 2022, doi: 10.3390/economies.

[28] K. Phale, L. Fanglin, I. A. Mensah, A. Y. Omari-Sasu, and M. Musah, "Knowledge-Based Economy Capacity Building for Developing Countries: A Panel Analysis in Southern African Development Community," *Sustain. 2021 Vol 13 Page 2890*, vol. 13, no. 5, pp. 2890–2890, Mar. 2021, doi: 10.3390/SU13052890.

[29] World Bank Group, "World Bank Group," DataBank. [Online]. Available: https://databank.worldbank.org/home.aspx

[30] G. Çetin, "Analysis of the Relationship Between Adjustment Savings: Education Expenditures and Economic Growth for USA," *JOEEP J. Emerg. Econ. Policy*, vol. 8, no. 1, pp. 1–9, Jun. 2023.

[31] C. O. Elom, R. U. Onyeneke, D. A. Ankrah, E. W. Deffor, H. M. Ayerakwa, and C. C. Uwaleke, "Achieving carbon neutrality in Africa is possible: the impact of education, employment, and renewable energy consumption on carbon emissions," *Carbon Res.*, vol. 3, no. 1, p. 24, Mar. 2024, doi: 10.1007/s44246-024-00102-7.

[32] World Bank Group, "Tertiary Education | World Bank Group," EDUCATION & SKILLS/Tertiary Education. Accessed: Jun. 10, 2026. [Online]. Available: https://www.worldbank.org/ext/en/topic/education/tertiary-education

[33] World Bank Group, "Fixed broadband subscriptions," DataBank. Accessed: Jun. 16, 2026. [Online]. Available: https://databank.worldbank.org/metadataglossary/world-development-indicators/series/IT.NET.BBND

[34] M. V. Alderete, "El efecto de la banda ancha en el crecimiento económico de América Latina: una aproximación basada en un modelo de ecuaciones simultáneas," *CEPAL*, vol. 138, Dec. 2022, [Online]. Available: https://hdl.handle.net/11362/48673

[35] R. Katz and F. Callorda, "Accelerating the development of Latin American digital ecosystem and implications for broadband policy," *Telecommun. Policy*, pp. 661–681, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.telpol.2017.11.002.

[36] R. F. Engle and C. W. J. Granger, "Co-Integration and Error Correction: Representation, Estimation, and Testing," *Econometrica*, vol. 55, no. 2, pp. 251–276, 1987, doi: 10.2307/1913236.

[37] P. Pedroni, "Critical Values for Cointegration Tests in Heterogeneous Panels with Multiple Regressors," *Oxf. Bull. Econ. Stat.*, vol. 61, no. S1, pp. 653–670, 1999, doi: 10.1111/1468-0084.0610s1653.

[38] P. Pedroni, "PANEL COINTEGRATION: ASYMPTOTIC AND FINITE SAMPLE PROPERTIES OF POOLED TIME SERIES TESTS WITH AN APPLICATION TO THE PPP HYPOTHESIS," *Econom. Theory*, vol. 20, no. 3, pp. 597–625, Jun. 2004, doi: 10.1017/S0266466604203073.

[39] J. Westerlund, "Testing for Error Correction in Panel Data," *Oxf. Bull. Econ. Stat.*, vol. 69, no. 6, pp. 709–748, 2007, doi: 10.1111/j.1468-0084.2007.00477.x.

[40] P. Pedroni, "Fully modified OLS for heterogeneous cointegrated panels," in *Nonstationary Panels, Panel Cointegration, and Dynamic Panels*, vol. 15, B. H. Baltagi, T. B. Fomby, and R. Carter Hill, Eds., Emerald Group Publishing Limited, 2001, p. 0. doi: 10.1016/S0731-9053(00)15004-2.

[41] R. Little and D. Rubin, *Statistical Analysis with Missing Data, Third Edition*, 1st ed. in Wiley Series in Probability and Statistics. Wiley, 2019. doi: 10.1002/9781119482260.
[42] S. Moritz and T. Bartz-Beielstein, "imputeTS: Time Series Missing Value Imputation in R," *R J.*, vol. 9, no. 1, p. 207, 2017, doi: 10.32614/RJ-2017-009.
[43] L. A. Tobar Piril, "La educación superior en Guatemala en la primera década del siglo XXI," *Innov. Educ.*, vol. 11, no. 57, pp. 69–80, 2011.
[44] K. S. Im, M. H. Pesaran, and Y. Shin, "Testing for unit roots in heterogeneous panels," *J. Econom.*, vol. 115, no. 1, pp. 53–74, Jul. 2003, doi: 10.1016/S0304-4076(03)00092-7.
[45] M. H. Pesaran, "A simple panel unit root test in the presence of cross-section dependence," *J. Appl. Econom.*, vol. 22, no. 2, pp. 265–312, 2007, doi: 10.1002/jae.951.
[46] B. H. Baltagi, *Econometric Analysis of Panel Data*. Cham: Springer International Publishing, 2021. doi: 10.1007/978-3-030-53953-5.
[47] D. Hoechle, "Robust standard errors for panel regressions with cross-sectional dependence," *Stata J.*, vol. 7, no. 3, pp. 281–312, 2007, doi: 10.1177/1536867X0700700301;REQUESTEDJOURNAL:JOURNAL:STJA;PAGEGROUP:STRING:PUBLICATION.
[48] D. Gujarati and D. Porter, *Econometría*, Quinta edición. McGraw-Hill, 2010.
[49] J. Miles, "Tolerance and Variance Inflation Factor," *Wiley StatsRef Stat. Ref. Online*, Sep. 2014, doi: 10.1002/9781118445112.STAT06593.
[50] C. F. Baum and B. College, "Residual diagnostics for cross-section time series regression models," 2001. [Online]. Available: https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/1536867x0100100108
[51] T. S. Breusch and A. R. Pagan, "The Lagrange Multiplier Test and its Applications to Model Specification in Econometrics," *Rev. Econ. Stud.*, vol. 47, no. 1, pp. 239–239, Jan. 1980, doi: 10.2307/2297111.
[52] N. Beck and J. N. Katz, "What To Do (and Not to Do) with Time-Series Cross-Section Data," *Am. Polit. Sci. Rev.*, vol. 89, no. 3, pp. 634–647, Sep. 1995, doi: 10.2307/2082979.
[53] C. W. J. Granger, "Some recent development in a concept of causality," *J. Econom.*, vol. 39, no. 1, pp. 199–211, Sep. 1988, doi: 10.1016/0304-4076(88)90045-0.
[54] W. Enders, *Applied Econometric Time Series*, 4th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2014.
[55] E. Baldacci, B. Clements, S. Gupta, and Q. Cui, "Social Spending, Human Capital, and Growth in Developing Countries: Implications for Achieving the MDGs," *Soc. Sci. Res. Netw.*, 2004, doi: 10.5089/9781451875140.001.A001.
[56] R. J. Barro and X. I. Sala-i-Martin, *Economic Growth*, 2nd ed. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2003.
[57] C. Melara-Gálvez and E. J. Morales-Fernández, "A Comparative Analysis of the Competitiveness of Central American Countries Based on the Global Competitiveness Index before the COVID-19 Pandemic," *Sustainability*, vol. 14, no. 14, p. 8854, Jan. 2022, doi: 10.3390/su14148854.
[58] N. G. Mankiw, D. Romer, and D. N. Weil, "A Contribution to the Empirics of Economic Growth*," *Q. J. Econ.*, vol. 107, no. 2, pp. 407–437, May 1992, doi: 10.2307/2118477.
[59] E. A. Hanushek and L. Woessmann, "Educación y crecimiento económico," in *Oxford Research Encyclopedia of Economics and Finance*, A. Banerjee, Ed., Oxford University Press, 2021, p. 0. doi: 10.1093/acrefore/9780190625979.013.651.
[60] R. P. Pradhan, G. Mallik, and T. P. Bagchi, "Information communication technology (ICT) infrastructure and economic growth: A causality evinced by cross-country panel data," *IIMB Manag. Rev.*, vol. 30, no. 1, pp. 91–103, Mar. 2018, doi: 10.1016/J.IIMB.2018.01.001.
[61] D. H. C. Chen and C. J. Dahlman, "Knowledge and Development: A Cross-Section Approach," Aug. 2004, doi: 10.1596/1813-9450-3366.
[62] X. Cierra and W. Maloney, "The Innovation Paradox : Developing-Country Capabilities and the Unrealized Promise of Technological Catch-up : The innovation paradox : developing-country capabilities and the unrealized promise of technological catch-up," World Bank, Washington, D.C., Publication 120336, 2017. doi: 10.1596/978-1-4648-1160-9.
[63] Y. O. Akinwale, "Towards understanding the triangular relationship between technology innovation, human capital and economic growth in South Africa," *Int. J. Learn. Change*, vol. 14, no. 3, pp. 258–272, Jan. 2022, doi: 10.1504/IJLC.2022.122521.
[64] P. Aghion and P. Howitt, "A Model of Growth Through Creative Destruction," *Econometrica*, vol. 60, no. 2, pp. 323–323, Mar. 1992, doi: 10.2307/2951599.
[65] J. M. . Wooldridge, *Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data, second edition*, 2nd ed. London, England: MIT Press, 2010. [Online]. Available: https://mitpress.mit.edu/9780262232586/econometric-analysis-of-cross-section-and-panel-data/
[66] W. Cai, S. Jusoh, R. S. A. R. A. Rahman, X. Liu, and S. Wang, "Role of innovation and human capital in regional economic growth and progress," *JIPD*, vol. 8, no. 13, p. 9107, Nov. 2024, doi: 10.24294/jipd9107.
[67] A. Rangel Correa, A. Cotte Poveda, and C. I. Pardo Martínez, "Economic growth and human capital: an approach from dynamic stochastic general equilibrium and vector error correction modelling for Colombia," *Qual. Quant.*, vol. 60, no. 1, pp. 2535–2562, Feb. 2026, doi: 10.1007/s11135-025-02350-0.
[68] UNESCO, "Education 2030: Incheon Declaration and Framework for Action for the implementation of Sustainable Development Goal 4." 2016. Accessed: Jun. 10, 2026. [Online]. Available: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000245656
[69] E. A. Hanushek and L. Woessmann, "Education, knowledge capital, and economic growth," in *The Economics of Education*, Elsevier, 2020, pp. 171–182. doi: 10.1016/B978-0-12-815391-8.00014-8.
[70] OECD, *Going Digital: Shaping Policies, Improving Lives*. OECD Publishing, 2019. doi: 10.1787/9789264312012-en.
[71] World Bank, "World Development Report 2016: Digital Dividends," World Bank, Washington, D.C., 2016. doi: 10.1596/978-1-4648-0671-1.