Henry Nicolás Carvajal - 201718787

Julián Delgado Gutiérrez - 201712798

Mariana Villabona Martínez – 201816559

**Actividad práctica 3: Pruebas de hipótesis y comparación de grupos**

## Planteamiento conceptual y formulación de hipótesis

1. **Marco conceptual**

El ingreso económico, bajo la matriz energética predominante, se encuentra estrechamente vinculado al consumo de energía y de bienes materiales. Dado que gran parte de la oferta energética global sigue sustentándose en combustibles fósiles, carbón y petróleo, principalmente, es plausible observar una relación positiva entre actividad económica y emisiones de CO₂. En esa línea, diversos trabajos (Singh, 2024; Eunho, 2010; Onofrei et al., 2022) documentan asociaciones estadísticamente significativas, aunque con magnitudes y formas funcionales que varían según la etapa de desarrollo, la estructura productiva y el régimen de apertura comercial de cada país.

Ahora bien, las teorías que intentan explicar dicha relación no son unívocas ni necesariamente lineales. La Curva Ambiental de Kuznets (EKC) postula una trayectoria en forma de “u” invertida: en fases iniciales del crecimiento, la contaminación aumenta por efectos de escala y composición (industrialización, expansión manufacturera), pero a partir de umbrales de ingreso más altos, el progreso técnico, cambios en la mezcla energética y regulaciones ambientales más estrictas inducen caídas graduales de las emisiones por unidad de producto. Esta narrativa contrasta con evidencia como la reportada por Eunho (2010), que enfatiza la heterogeneidad temporal y entre países, incluyendo perfiles no monotónicos tipo “N” (observados para China), donde nuevos impulsos de crecimiento y reconfiguraciones sectoriales reactivan las emisiones incluso tras fases de aparente desacoplamiento.

En términos econométricos, también se han hallado relaciones de largo plazo: por ejemplo, Onofrei et al. (2022) reportan cointegración unidireccional en la que un aumento del 1% del PIB se asocia con un incremento cercano a 0,072 en las emisiones de CO₂, lo que sugiere elasticidades positivas pero relativamente moderadas en el margen. La Identidad de Kaya (1989) aporta un marco contable que descompone las emisiones como el producto de cuatro factores: población, afluencia (PIB per cápita), intensidad energética (energía por unidad de PIB) e intensidad de carbono (CO₂ por unidad de energía). Esta desagregación permite distinguir si el aumento de emisiones proviene del tamaño de la economía y la población (efecto escala) o de ineficiencias tecnológicas y de la matriz energética (efectos de técnica e intensidad).

Existen, además, argumentos críticos. La hipótesis de “desacoplamiento”, relativo o absoluto, sugiere que algunas economías avanzadas, como la Unión Europea, han logrado reducir la intensidad de carbono mediante innovación, impuestos al carbono y expansión de renovables (Singh, 2024). Otros señalan efectos de “fuga de carbono”: la apertura comercial y las cadenas globales de valor pueden relocalizar industrias intensivas en emisiones hacia países de menor ingreso, atenuando la relación ingreso, emisiones en el país importador sin reducir necesariamente las emisiones globales (Davis y Caldeira, 2010). Finalmente, mediciones per cápita versus totales, diferencias sectoriales (transporte, electricidad, industria) y la contabilidad de emisiones incorporadas en el comercio complican la inferencia causal y reclaman diseños empíricos cuidadosos (series de tiempo con pruebas de cointegración, paneles con efectos fijos, o estrategias cuasi-experimentales), así como controles por estructura productiva y calidad institucional.

En suma, el vínculo entre ingreso y CO₂ existe y es robusto en promedio, pero su forma, elasticidad y dirección dependen críticamente del contexto tecnológico, la política pública y la integración comercial.

1. **Planteamiento de la hipótesis**

Con el marco conceptual anterior, la hipótesis nula (H₀) que sostenemos es que el nivel de ingresos, medido a través del pib per cápita, no se asocia con diferencias en las emisiones per cápita de CO2. Esto es:

Este planteamiento supone que la media de las emisiones de CO2 per cápita promedio para países de alto ingreso es equivalente a la media de las emisiones de CO2 per cápita promedio de países de bajo ingreso.

Por otro lado, la hipótesis alternativa (Ha) en este sentido sería que el nivel de ingresos sí influye en las emisiones per cápita y está diferenciada por niveles de ingreso. Para probar esta hipótesis realizaremos una prueba de cola derecha de forma tal que:

Lo que quiere decir que las emisiones de CO2 promedio de países con mayor nivel de ingreso económico, son mayores que las de países con ingreso económico más bajo. Un contraste bilateral sería incorrecto dado que nuestro interés es demostrar que mayor nivel de ingreso implica mayor nivel de emisiones de CO2 per cápita. Optaríamos por un contraste bilateral, o de dos colas si quisiéramos ser totalmente agnósticos y probar cualquier diferencia ().

1. **Error Tipo I y Tipo II**

**Error tipo I (falso positivo):** Cometer un error tipo I sería afirmar que sí existe una diferencia significativa (afirmar que los países ricos contaminan más per cápita) cuando en realidad no la hay en la población. Dicha conclusión podría conllevar a mala formulación de política en tanto se podrían imponer castigos internacionales a países ricos por las emisiones per cápita, o diseñar estrategias de mitigación basadas en una premisa falsa de disparidad. Se estaría sobreestimando el rol del ingreso en las emisiones, lo cual podría implicar injusticias o ineficiencias.

**Error tipo II (falso negativo):** Cometer un error tipo II implicaría no rechazar la hipótesis nula H₀ cuando la hipótesis alternativa Ha es verdadera. Es decir, concluir que no hay diferencias entre países ricos y pobres cuando en realidad los países de mayor ingreso sí emiten significativamente más CO₂ por habitante. La consecuencia aquí sería subestimar el impacto de las economías de mayor nivel de ingreso en el nivel de emisión de CO2 per cápita. Subestimar la contribución de las naciones ricas conllevaría a inacción o políticas insuficientes; a no establecer responsabilidades diferenciadas en acuerdos internacionales o fallar en destacar la necesidad de que las economías más opulentas transformen sus modelos energéticos.

1. **Definición de indicadores**

Para llevar a cabo el análisis, identificamos claramente las variables involucradas y cómo se medirán, utilizando datos de World Development Indicators del Banco Mundial.

**La variable dependiente (Y)** serán las Emisiones de CO₂ per cápita que mide las toneladas métricas de CO₂ emitidas por persona en cada país durante un año. Abarca emisiones derivadas de la quema de combustibles fósiles y la fabricación de cemento dentro del territorio nacional (World Bank, s.f). Se expresa en toneladas de CO₂ por habitante.

**La variable independiente de clasificación (X)** será el nivel de ingreso del país medido a través del PIB per cápita. Utilizaremos el PIB per cápita como proxy del nivel de desarrollo/ingreso del país, y dividiremos a los países en dos grupos en función de ese nivel. En concreto, aplicaremos el criterio de clasificación del Banco Mundial por ingreso nacional dado que este se calcula anualmente a partir de umbrales de Ingreso Nacional Bruto per Cápita (Hamadeh N et al., 2023), por lo que permite controlar por el nivel poblacional y niveles de desarrollo.

Así, nuestro grupo 1 (alto ingreso) comprenderá economías avanzadas con ingresos por encima de ese umbral, y el grupo 2 reunirá a las economías con ingresos por debajo del umbral (que abarcan desde países muy pobres hasta emergentes de ingreso medio). Además, usaremos la información de 2023 para cada país.

La agrupación es útil porque fija un punto de comparación controlando por una característica clave: la población. Además, el umbral de ingreso, definido y validado internacionalmente, facilita un criterio reproducible con otras fuentes de datos. Tener solo dos grupos (países ricos vs. no ricos) puede aumentar la potencia para detectar diferencias si el ingreso realmente influye en las emisiones.

No obstante, el grupo “no rico” es amplio y heterogéneo (ingresos bajo y medio), lo que eleva la varianza y el riesgo de errores tipo I/II. Sería preferible contrastes escalonados (bajo vs. medio vs. alto) para preservar información sobre la gradación de emisiones a lo largo del espectro de ingresos. Al dicotomizar, podemos perder relaciones continuas o no lineales.

## Análisis inicial de la información

Para iniciar el análisis de la posible relación entre las emisiones de dióxido de carbono y el nivel de ingreso económico de los países, se realizó como primer paso una exploración individual de los datos históricos extraídos de los World Development Indicators. Estos datos se miden en dólares estadounidenses (US$) por año para representar el Producto Interno Bruto (PIB) per cápita y en toneladas de CO₂ per cápita para las emisiones.

Este análisis permite una primera aproximación descriptiva a los datos, identificando su comportamiento general, los valores extremos y una intuición sobre cómo han evolucionado tanto el PIB como las emisiones de CO₂ a lo largo del tiempo. En este caso, se dispone de información del PIB per cápita y de las emisiones de CO₂ per cápita correspondiente a 266 países, con registros que abarcan desde 1960 hasta 2024.

En términos generales, los valores observados de las emisiones de CO₂ per cápita presentan una media de 4,83 toneladas y una desviación estándar de 10,41 toneladas, lo que evidencia una alta dispersión entre países. Se destaca Palau, que en el año 2012 registró el mayor nivel de emisiones por persona, con 202,8 toneladas de CO₂.

No obstante, es importante mencionar que países como Mónaco y Liechtenstein, entre los de mayor PIB promedio histórico, no cuentan con datos reportados de emisiones de CO₂, lo cual limita un análisis plenamente comparativo. Además, se identifica que el máximo nivel de PIB per cápita registrado en la base se presenta precisamente en Mónaco en 2023, con US$256.580,5, siendo este valor aproximadamente 448 veces superior al promedio del PIB per cápita de los diez países con menor ingreso para ese mismo año, los cuales son mayoritariamente africanos.

**Grafica 1. Evolución de las emisiones per cápita (2003 - 2023)**

Gráfico, Gráfico de líneas

El contenido generado por IA puede ser incorrecto.

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, dado que teóricamente un mayor crecimiento económico podría implicar mayores emisiones, conviene observar cómo han evolucionado las emisiones de CO₂ en relación con el PIB a lo largo del tiempo. Una primera comparación entre economías con mayor PIB per cápita promedio y aquellas con menor nivel sugiere brechas marcadas en los niveles de contaminación, por lo que, de entrada, cabe esperar diferencias en los promedios de emisiones entre países de alto y bajo ingreso.

No obstante, el análisis histórico indica trayectorias divergentes: mientras el PIB per cápita promedio de los países exhibe una tendencia creciente, las emisiones de CO₂ per cápita muestran una tendencia decreciente. Esta dinámica matiza la hipótesis inicial y sugiere que la relación ingreso–emisiones puede estar mediada por factores como cambios tecnológicos, eficiencia energética, composición sectorial y políticas ambientales.

**Grafica 2. Evolución histórica del promedio del PIB per cápita y las emisiones de CO₂.**

Gráfico, Gráfico de líneas

El contenido generado por IA puede ser incorrecto.

Fuente: Elaboración propia

Si bien la economía de los países de manera general ha aumentado, esta no ha sido necesariamente acompañada por un aumento en el mismo sentido de las emisiones. Esto nos podría sugerir que se ha logrado un crecimiento económico más sostenible y podría poner en duda la relación entre el nivel del PIB y el total de emisiones.

No obstante, se observa que la mayor aceleración del PIB promedio después del año 2000 coincide con un repunte de las emisiones contaminantes. Por lo que se podría intuir que el mayor crecimiento económico también tiene cierto efecto en el crecimiento de las emisiones contaminantes. Frente a estas dudas paríamos a un análisis por medio de las pruebas de hipótesis, buscando resolver estadísticamente si existe o no está relación entre PIB y emisiones de CO₂.

## Estimación de los promedios

Para este ejercicio se tomaron las bases originales de PIB y emisiones de CO₂ per cápita para el año 2023. A partir del PIB per cápita, dividimos a los países usando como umbral la mediana de ese indicador: por encima de la mediana (alto ingreso) y por debajo (bajo ingreso). Con esta partición, las emisiones promedio de CO₂ per cápita son 7,43 toneladas en el grupo de alto ingreso y 1,49 toneladas en el de bajo ingreso.

**Tabla 1. Comparativa de las emisiones promedio de CO₂ per cápita según el nivel de PIB y sus intervalos de confianza Bootstrap**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Grupo de PIB** | **N° de países** | **Promedio CO₂ (ton/hab)** | **Bootstrap replicaciones** | **IC 95% BCa (Inferior)** | **IC 95% BCa (Superior)** | **IC 95% Percentil (Inferior)** | **IC 95% Percentil (Superior)** |
| **Alto PIB per cápita** | 120 | 7,435 | 10.000 | 6,287 | 9,862 | 6,066 | 9,198 |
| Bajo PIB per cápita | 119 | 1,496 | 10.000 | 1,231 | 1,852 | 1,209 | 1,806 |

La Tabla 1 presenta los resultados del análisis bootstrap para los dos grupos de países. Para los de alto PIB per cápita (n = 120), la media estimada es de 7,44 toneladas de CO₂ per cápita, con un intervalo de confianza del 95% BCa entre 6,29 y 9,86, y un intervalo percentil muy similar entre 6,07 y 9,20. Estos valores confirman que, en promedio, las emisiones de los países más ricos son sustancialmente mayores que las de los de bajo PIB. Además, la estimación se mantiene robusta aun cuando el método BCa ajusta el rango para capturar la asimetría de la distribución.

En contraste, los países con bajo PIB per cápita (n = 119) registran una media de 1,50 toneladas de CO₂ per cápita, con un intervalo de confianza del 95% BCa entre 1,23 y 1,85, y un intervalo percentil entre 1,21 y 1,81. Aquí, la concordancia casi total entre ambos métodos sugiere una distribución más simétrica y una mayor precisión en la estimación.

En conjunto, la tabla evidencia una diferencia marcada y consistente entre ambos grupos: los países más ricos emiten, en promedio, alrededor de cinco veces más CO₂ per cápita que los más pobres. A continuación, presentamos la misma información mostrando la distribución completa de las estimaciones y localizando los IC con ambos métodos.

**Grafica 3. Distribuciones bootstrap del promedio de emisiones de CO₂ per cápita para países con alto y bajo PIB.**

Gráfico, Gráfico de líneas, Histograma

El contenido generado por IA puede ser incorrecto.

Fuente: Elaboración propia

En estos gráficos se observa la distribución de las medias de emisiones de CO₂ obtenidas mediante bootstrap para los dos grupos de países. En el grupo con alto PIB per cápita, la masa de la distribución se concentra entre 6 y 9 toneladas de CO₂ per cápita, con ligera asimetría hacia valores altos. Esto se refleja en que el intervalo BCa (líneas verdes) resulta más amplio que el percentil (líneas rojas) y se extiende algo más hacia arriba, corrigiendo el sesgo y cubriendo la cola superior. En otras palabras, aunque la estimación central es estable, el método BCa reconoce mayor incertidumbre en la parte alta y la incorpora en el intervalo.

En contraste, los países con bajo PIB per cápita muestran una distribución de medias centrada alrededor de 1,5 toneladas de CO₂ per cápita, con forma mucho más simétrica. Aquí, los intervalos percentil y BCa prácticamente coinciden, lo que sugiere ausencia de sesgo relevante y menor asimetría. El resultado son estimaciones más precisas y bandas de confianza estrechas. En conjunto, los gráficos ilustran no solo la diferencia de magnitud entre ambos grupos, sino también cómo la elección del método de intervalo incide en la lectura, especialmente cuando la distribución no es perfectamente simétrica, como ocurre en el grupo de mayor ingreso.

**Tabla 2. Resultados de la estimación de la diferencia de medias de CO₂ entre los grupos de PIB.**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Grupo 1** | **Grupo 2** | **Diferencia promedio** | **IC 95% Inferior** | **IC 95% Superior** | **p-valor** |
| Alto PIB per cápita | Bajo PIB per cápita | 5,94 | 4,54 | ∞ | 5.073 × 10⁻¹¹ |

Por otro lado, al revisar los resultados de la Tabla 2 para la diferencia estimada mediante la prueba t de medias, encontramos hallazgos coherentes, aunque con una salvedad. Dado que el p-valor es mucho menor que 0,05, se rechaza la hipótesis nula al 5 % de significancia. Esto indica evidencia estadísticamente significativa de que los países con mayor PIB per cápita presentan mayores emisiones de CO₂ per cápita. Además, el intervalo de confianza no incluye el 0, lo que refuerza que la diferencia media es positiva (≈ 5,94 toneladas de CO₂ per cápita).

En suma, ambos enfoques llevan a la misma conclusión general: existe una diferencia positiva y estadísticamente significativa en las emisiones promedio de CO₂ per cápita entre países de alto y bajo PIB; por tanto, un mayor nivel de ingreso se asocia con mayor contaminación. La diferencia metodológica es que la prueba t supone normalidad y produce intervalos simétricos, mientras que el bootstrap BCa no depende de esa suposición y ajusta los límites para reflejar mejor la asimetría de la distribución.

## Conclusión

Los resultados obtenidos mediante las dos estimaciones muestran que **existe una diferencia estadísticamente significativa** entre las emisiones per cápita de los países con alto y bajo PIB. Un análisis inicial de la información histórica de los datos obtenidos en World Development Indicators, ya nos insinuaban este comportamiento, donde se observaba que naciones como Austria, Suecia y Finlandia, reconocidas por su elevado nivel económico, presentaban niveles de emisiones per cápita considerablemente superiores a los reportados por países como el Congo o Burundi, desde inicios de la década de los 2000.

Este comportamiento pude confirmarse, según la diferencia de medias mediante las estimaciones por Booststrap y la prueba-t en donde, para el año de referencia 2023, los países ricos emiten, en promedio, alrededor de **6 toneladas más de** **CO₂ per cápita** en el 2023 que los países de bajo ingreso. Esto pone en evidencia que el crecimiento económico también tiene implicaciones medioambientales considerables, reflejando una relación directa entre el ingreso y la presión ambiental.

En este sentido, esto refuerza la necesidad de que las economías más ricas asuman un papel más relevante en la reducción de emisiones y podría plantear la pregunta si las políticas actuales de protección ambiental son suficientes. Se debe reforzar las políticas de transición energética, tecnologías limpias y mecanismos de compensación ambiental que estén encaminadas no solo al crecimiento económico sino también al desarrollo sostenible

Por otro lado, el valor del **p-valor < 0.05** y el intervalo de confianza que no incluye el 0, confirman que **el resultado es estadísticamente significativo** y por ende es posible afirmar que los países de mayor ingreso emiten, en promedio, más CO₂ por habitante. Cabe aclarar, si el resultado no hubiera sido significativo, esto no implicaría necesariamente que no exista relación entre un mayor nivel del PIB y un aumento de las emisiones, sino que los datos disponibles no aportarían evidencia suficiente para confirmar dicha asociación, lo que podría deberse a la variabilidad de los datos, el tamaño limitado de la muestra analizada o incluso la metodología utilizada para agrupar a los países o el año tomado de referencia.

Estas causas mencionadas anteriormente también nos hacen plantearnos el caso en donde cayéramos en un falso positivo (error tipo I) aunque su probabilidad es baja dado el p-valor obtenido. En caso contrario, suponiendo un falso negativo (error tipo II), implicaría no detectar una diferencia real, subestimando la responsabilidad ambiental de los países ricos, lo que sería más costoso en términos ambientales.

Por último, es importante mencionar que esta conclusión podría estar limitada al estar analizando datos agrupadas a nivel de país, lo que podría estar ocultando comportamientos regionales o a nivel local, además de la falta de otras variables y características propias de los países que pueden alterar su nivel de PIB y de emisiones de CO₂. Además, el uso de métodos Bootstrap, datos más completos entre PIB y emisiones, la utilización de una muestra con una mayor cantidad de datos de análisis y la exclusión de valores atípicos podrían mejorar la robustez de las estimaciones. Por tanto, aunque los resultados confirman una relación sólida entre desarrollo económico y aumento de las emisiones, su generalización debe hacerse con precaución.

Biografía

Hamadeh, N., Van Rompaey, C., & Metreau, E. (2023). Clasificación de los países elaborada por el Grupo Banco Mundial según los niveles de ingreso para el año fiscal 24 (1 de julio de 2023-30 de junio de 2024).

Singh, S. (2024). The relationship between growth in GDP and CO2 has loosened; it needs to be cut completely. *IEA, January*.

Mitić, P., Fedajev, A., Radulescu, M., & Rehman, A. (2023). The relationship between CO2 emissions, economic growth, available energy, and employment in SEE countries. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(6), 16140-16155.

Murthy, U., Shaari, M. S., Mariadas, P. A., & Abidin, N. Z. (2021). The relationships between CO₂ emissions, economic growth and life expectancy. *The Journal of Asian Finance, Economics and Business (JAFEB)*, *8*(2), 801-808.

Steven J. Davis and Ken Caldeira. Consumption-based accounting of CO2 emissions. PNAS, March 8, 2010 DOI: 10.1073/pnas.0906974107

World Bank. (s.f.). CO2 emissions (metric tons per capita) [EN.ATM.CO2E.PC]. Recuperado de https://databank.worldbank.org/metadataglossary/world-development-indicators/series/EN.ATM.CO2E.PC