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, dada la matriz energética actual, está estrechamente ligado con el consumo de energía y bienes materiales. En particular, para proveer estos servicios se suele depender de bienes fósiles cómo el carbón o el petróleo (Sighn, 2024). Por ello estudios cómo el realizado por Eunho (2010), Sighn (2024), Onoffrei et al (2022), demuestran la existencia de dicha relación.

Las teorías se contraponen entre sí y no necesariamente indicarían que existe una relación lineal entre el crecimiento económico y las emisiones de CO2. La teoría de la Curva ambiental de Kuznets (EKC por sus siglas en inglés) argumenta que, en los primeros años de crecimiento económico, la contaminación ambiental aumenta; sin embargo, a medida que la economía continúa creciendo, el nivel de contaminación y degradación ambiental disminuye gradualmente.

Esta teoría se contrapone a lo encontrado Eunho (2010) que indica que la relación depende de las características nacionales y temporales de cada nación; sobretodo explicando que la apertura económica y el nivel de desarrollo económico conllevaría a una relación diferente entre las emisiones y el nivel de ingresos; llevando a formas tan diversas como una N (caso de China). Por otra parte, una tercera hipótesis sugiere que sí existe una cointegración de largo plazo unidireccional en la que mayores niveles de ingreso económico y las emisiones de CO2, indicando que un aumento del 1% en el PIB se asocia con un incremento de 0.072 en las emisiones de CO2 (Onoffrei et al ,2022).

Finalmente, la identidad de Kaya la Identidad de Kaya (1989) amplía la relación a un marco contable que descompone las emisiones totales de CO2 en cuatro factores clave: Población, Afluencia o PIB per cápita, Intensidad Energética, e Intensidad de Carbono cuantificar los impulsores de las emisiones a lo largo del tiempo.

Respecto a estas teorías existen opositores, que argumentan por ejemplo sobre la teoría del desacoplamiento. El desacomplamiento entre las emisiones de CO2 per cápita y el ingreso económico apoyaría la teoría de la EKC, en tanto en las últimas décadas se observaría una transición hacia energías más limpias en economías avanzadas cómo la Unión Europea (Sigh, 2024). Otras a que la apertura económica ha generado una relocalización de las industrias intensivas en carbono hacia economías con menor nivel de ingreso; por lo que no necesariamente se encontraría una relación positiva entre el nivel de ingreso per cápita y las emisiones de CO2 (Davis y Caldeira, 2010).

1. **Planteamiento de la hipótesis**

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

Esto es 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.

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 haremos sostendremos 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):** Sería concluir 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. 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 (World Bank, s.f), por lo que permite controlar por el nivel poblacional y niveles de desarrollo. Siendo así, se tendría una agrupación de países de ingreso alto y por otro lado los países de ingreso bajo (incluyen ingreso bajo, ingreso medio-bajo e ingreso medio-alto).

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).

Usaremos la información de 2023 para cada país. Al comparar este valor entre grupos de países, podremos ver si, en promedio, un individuo en un país rico emite más CO₂ que uno en un país pobre.

La agrupación utilizada es de utilidad en tanto permite establecer un punto de comparación controlando por una característica fundamental de cada economía, cómo lo es la población. Por otra parte, el umbral se basa en ingreso definido y validado internacionalmente que permite generar un agrupamiento que podría ser fácilmente reproducible se utilizar otras bases de datos. A su vez, únicamente tener dos grupos de comparación (países ricos y países no ricos) permite incrementar la probabilidad de identificar con mayor precisión diferencias significativas si realmente el ingreso influye en el nivel de las emisiones.

Reconocemos sin embargo que existen algunas limitaciones sobre el criterio utilizado. Por ejemplo, el utilizar una agrupación muy amplia en el grupo de países pobres (incluyendo todos los de ingreso medio y bajo) hace que la variación al interior de este sea más amplia y heterogénea; por lo que podríamos incrementar la probabilidad de cometer un error tipo I o II. Podría ser más correcto realizar pruebas de hipótesis escalonadas, de forma tal que se comparara gradualmente ingresos bajos vs medios vs altos. Al reducir todo a dos grupos extremos, perdemos información sobre cómo las emisiones crecen a lo largo del espectro de ingresos. La relación podría no ser simplemente categórica sino continua o no lineal, y con dos grupos podríamos pasar por alto esos matices.

## Análisis inicial de la información

Para iniciar el análisis de la posible relación entre las emisiones de dióxido de carbono y el nivel de desarrollo 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 encuentran medidos por la cantidad de dólares ($US) por año para representar el Producto Interno Bruto (PIB) per cápita y las emisiones medidas en toneladas de CO₂ per cápita.

Este análisis nos permite realizar una primera aproximación descriptiva a los datos, identificando su comportamiento general, los valores extremos y una intuición de cómo han evolucionado tanto el PIB como las emisiones de CO₂ a través 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 desde1960 y 2024.

De manera general, los valores observados de las emisiones de CO₂ per cápita muestran 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, el cual registro en el año 2012 el mayor nivel de emisiones contaminantes con 202,8 toneladas de CO2.

No obstante, es importante mencionar que países como Mónaco y Liechtenstein, los países con los niveles más altos de PIB promedio histórico, no cuentan con datos reportados de emisiones de CO₂, lo cual es un aspecto que limita el completo análisis de la información. Además, se identifica que el máximo nivel del PIB registrado en la base de datos se presenta precisamente en Mónaco en 2023, con 256.580,5 $US, siendo este valor aproximadamente **448 veces mayor** que el promedio del PIB per cápita de los diez países con menor ingreso para el 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, tomando en cuenta que se espera que un mayor nivel de crecimiento económico teóricamente conllevaría mayores emisiones, es importante considerar como ha evolucionado el crecimiento de las emisiones de CO2 a lo largo del tiempo con relación al PIB. Es así como, si hacemos una primera comparación del comportamiento histórico del país con mayor PIB promedio con respecto a los de menor valor, es evidente que existe una gran diferencia en los niveles de contaminación entre cada territorio. Por lo que se podría esperar que preliminarmente es probable una diferencia entre los promedios de emisiones entre los países con PIB alto y los de PIB bajo.

Sin embargo, el análisis histórico de los datos muestra que el PIB per cápita promedio de los países ha mantenido una tendencia creciente, mientras que las emisiones de CO₂ per cápita presentan una tendencia decreciente.

**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

Como mencionamos anteriormente, se tomaros las bases originales de información de PIB y emisiones de CO₂ per cápita para el año de referencia 2023. Así mismo, dividimos los países en la base de datos tomando como limite la mediana de las emisiones promedio en este año para dividir los países en dos grupos, aquellos por encima de la mediana que son los de alto PIB, y los que están por debajo que son los de bajo nivel de PIB. De cada uno de estos grupos se encontró que la media de las emisiones son respectivamente 7.43 y 1.49 toneladas de CO₂.

**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 X presenta los resultados del análisis bootstrap los dos grupos de países. Para los de alto PIB per cápita (n = 120), la media estimada fue 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 más altas en comparación a los países de bajo PIB. Además, la estimación es robusta aun cuando el método BCa ajusta el rango para contemplar la asimetría de la distribución.

En contraste, los países con bajo PIB per cápita (n = 119) muestran 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 refleja una distribución más simétrica y un nivel de precisión mayor 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 países más pobres. A continuación, presentamos esta misma información, pero mostrando la distribución real de las estimaciones y localizando los IC usando los dos diferentes métodos.

**Grafica 3. Distibuciones Bootstrap del promedio de emisiones de CO₂ para cada grupo de PIB.**

Gráfico, Gráfico de líneas, Histograma

El contenido generado por IA puede ser incorrecto.

Fuente: Elaboración propia

En estos gráficos es posible observar la distribución de las medias de emisiones de CO₂ obtenidas mediante bootstrap para los dos grupos de países. En el caso de los países con alto PIB per cápita, la distribución de las medias se concentra entre 6 y 9 toneladas de CO₂ per cápita, pero con una ligera asimetría hacia valores más altos. Esto se refleja en que el intervalo BCa (líneas verdes) es más amplio que el percentil (líneas rojas), extendiéndose un poco más hacia arriba para corregir el sesgo y cubrir la cola superior de la distribución. En otras palabras, aunque la estimación central es estable, el método BCa reconoce que puede haber mayor incertidumbre en los valores altos y lo incorpora en el intervalo.

En contraste, los países con bajo PIB per cápita presentan una distribución de medias centrada en torno a 1.5 toneladas de CO₂ per cápita, con una forma mucho más simétrica. En este caso, los intervalos percentil y BCa prácticamente coinciden, lo que indica que no hay un sesgo importante ni asimetría marcada en la distribución. Esto se traduce en estimaciones muy precisas y en intervalos de confianza estrechos. En conjunto, los gráficos ilustran no solo la diferencia de magnitud en las emisiones entre ambos grupos, sino también cómo la elección del método de intervalo puede afectar la interpretación, especialmente cuando la distribución no es perfectamente simétrica, como sucede en el grupo de mayor riqueza.

**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, si observamos los resultados de esta diferencia calculada mediante la Prueba t de diferencia de medias encontramos resultados de cierta forma similares pero que requieren una consideración. Dado que el p-valor es mucho menor que 0,05, rechazamos la hipótesis nula al 5 % de significancia. Esto nos quiere decir que existe evidencia estadísticamente significativa de que los países con mayor PIB per cápita tienen mayores emisiones de CO₂ per cápita. Además, el intervalo de confianza no incluye el 0, reforzando la conclusión de que la diferencia media es positiva (alrededor de 5.94 toneladas de CO₂ per cápita).

Por medio de ambos métodos, se llega a la misma conclusión general: existe una diferencia estadísticamente significativa y positiva en las emisiones promedio de CO₂ per cápita entre los países de alto y bajo PIB, por lo que es posible afirmar que a un mayo nivel del PIB si existe relación con una mayor contaminación. La diferencia entre ambos métodos radica en que la prueba t asume normalidad y genera intervalos simétricos, mientras que el método bootstrap BCa no depende de esta condición y ajusta el intervalo para reflejar mejor la asimetría en 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 platear la pregunta si las políticas actuales de protección ambiental son suficientes. Dado esto, 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) en donde se concluiría que los países ricos emiten más CO₂ cuando según esta situación en realidad no hay diferencia verdadera, lo que implicaría sancionar injustamente a países ricos por diferencias inexistentes, 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, este estudio se presta para un mayor estudio y su generalización debe hacerse con precaución

Biografía

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