



Análisis de emisiones de CO₂ en Perú a través de componentes principales y clasificación jerárquica

ARTÍCULO ORIGINAL



Escanea en tu dispositivo móvil
o revisa este artículo en:
<https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v8i22.257>

Analysis of CO₂ emissions in Peru through principal components and hierarchical classification

Análise de emissões de CO₂ no Peru através de componentes principais e classificação hierárquica

Julio Cesar Quispe Mamani¹ 
jcquispe@unap.edu.pe

Charles Arturo Rosado Chávez² 
charlesrosado575@gmail.com

Lucas Ponce Quispe¹ 
lucasponce2070@gmail.com

Marcial Guevara Mamani¹ 
mguevara@unap.edu.pe

German Roberto Quispe Zapana¹ 
germanroberto5@gmail.com

Manuel Timoteo Enriquez Tavera¹ 
menriqueztavera@gmail.com

¹Universidad Nacional del Altiplano. Puno, Perú

²Universidad Nacional de Moquegua. Moquegua, Perú

Artículo recibido 30 de noviembre 2023 / Arbitrado 20 de diciembre 2023 / Publicado 20 de enero 2024

RESUMEN

La emisión de CO₂ tiene dentro de sus impactos negativos su contribución al calentamiento global del planeta. El objetivo de la investigación fue examinar las relaciones entre fuentes de emisiones y remociones de CO₂ a través de un análisis de componentes principales (ACP) y conglomerados jerárquicos. La investigación se desarrolló mediante un diseño observacional de cohorte retrospectivo. Fueron analizados datos públicos del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) en el período 2000-2019. Los resultados muestran que los sectores relacionados con la Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra (ASOUT) son los que más generan CO₂ a la atmósfera. El ACP permitió reducir la información disponible de 78 variables a siete CP y dos cluster. Se concluye que la aplicación de ACP permitió identificar patrones en los datos resultantes de la clasificación de las fuentes y sumideros generadores de emisiones de CO₂ en diferentes sectores económicos del país.

Palabras clave: Análisis de Componentes Principales; Calentamiento global; Cambio climático; Dióxido de carbono; Fuentes de Dióxido de carbono; Gases de efecto invernadero

ABSTRACT

The emission of CO₂, among its negative impacts, contributes to the global warming of the planet. The objective of the research was to examine the relationships between sources of CO₂ emissions and removals through a Principal Component Analysis (PCA) and Hierarchical Classification. The study was conducted using a retrospective observational cohort design. Public data from the National Greenhouse Gas Inventory (INGEI) for the period 2000-2019 were analyzed. The results indicate that sectors related to Agriculture, Forestry, and Other Land Uses (ASOUT) are the major CO₂ emitters. The PCA reduced the available information from 78 variables to seven principal components and two clusters. It is concluded that the application of PCA helped identify patterns in the data resulting from the classification of sources and sinks generating CO₂ emissions in different economic sectors of the country.

Key words: Principal Component Analysis; Global Warming; Climate Change; Carbon Dioxide; Carbon Dioxide Sources; Greenhouse Gases

RESUMO

A emissão de CO₂, entre seus impactos negativos, contribui para o aquecimento global do planeta. O objetivo da pesquisa foi examinar as relações entre fontes de emissões e remoções de CO₂ por meio de uma análise de Componentes Principais (ACP) e Classificação Hierárquica. O estudo foi conduzido por meio de um desenho observacional de coorte retrospectivo. Foram analisados dados públicos do Inventário Nacional de Gases de Efeito Estufa (INGEI) no período de 2000 a 2019. Os resultados mostram que os setores relacionados à Agricultura, Silvicultura e Outros Usos da Terra (ASOUT) são os maiores geradores de CO₂ na atmosfera. O ACP reduziu a informação disponível de 78 variáveis para sete CP e dois clusters. Conclui-se que a aplicação do ACP permitiu identificar padrões nos dados resultante da classificação das fontes e sumidouros geradores de emissões de CO₂ em diferentes setores econômicos do país.

Palavras-chave: Análise de Componentes Principais; Aquecimento Global; Mudanças Climáticas; Dióxido de Carbono; Fontes de Dióxido de Carbono; Gases de Efeito Estufa

INTRODUCCIÓN

En la actualidad los efectos negativos y nocivos que afectan el medio ambiente son, cada vez más significativos y más evidentes a nivel mundial, resaltan entre los mayores problemas con peculiaridad aquellos que causan daño a la capa de ozono, además los que contribuyen con el calentamiento global, así como la contaminación en zonas urbanas. En este sentido, unas de las causas principales de estos problemas o fenómenos son por las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), gas considerado como el de mayor efecto invernadero que se emite a raíz de las actividades del ser humano (1).

Las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) provocan el fenómeno conocido como efecto invernadero. Este efecto se produce cuando el CO₂ y otros gases, como el ozono, vapor de agua, óxido nitroso, entre otros, se acumulan en la atmósfera, reteniendo el calor generado por la radiación solar. Estos gases, denominados gases de efecto invernadero, son resultado tanto de procesos naturales, como la evaporación de los mares y las erupciones volcánicas, como de actividades humanas, principalmente industriales. La naturaleza tiene una capacidad de absorción de estos gases, sin que se produzcan cambios significativos en el medio ambiente. Sin embargo, en años recientes, el crecimiento poblacional y el aumento de la actividad económica han generado una mayor emisión de estos gases por encima de la capacidad de absorción natural. Esto ha resultado en un incremento de las temperaturas y alteraciones en las condiciones ambientales (2).

Para el año 2022 a nivel mundial las emisiones totales de dióxido de carbono (CO₂) tuvo un aumento de más de 200 millones de toneladas, este aumento fue el mayor de la historia en términos absolutos, las emisiones mundiales de dióxido de carbono que tienen relación con la energía alcanzaron los 36 millones de toneladas, estableciendo el nivel más alto registrado ya que debido a la pandemia la economía mundial tuvo que dinamizarse con mayor rapidez e impulsar esta recuperación y crecimiento dependió en mayor nivel del carbón, según el análisis de la Agencia Internacional de la Energía (AIE) (3-5).

En 2021, las emisiones de CO₂ en el Perú han crecido 8,557 megatoneladas, esto significa un crecimiento de un 18,37% respecto al año anterior 2020. Las emisiones del dióxido de carbono CO₂ en el año 2021 han sido equivalentes a 55,144 megatoneladas, con lo que Perú se sitúa como el país número 129 en el ranking de países por emisiones de dióxido de carbono CO₂, formado por 184 países en total, en el que se ordenan los países de menos a más contaminantes (6).

Un mecanismo creado a nivel mundial para el tratamiento a este problema fue la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, la cual entró en vigor el 21 de marzo de 1994. Hoy en día, tiene una membresía casi universal. Los 197 países que han ratificado la Convención se denominan Partes en la Convención. El objetivo final es estabilizar las concentraciones de gases de efecto invernadero "a un nivel que impida interferencias antropógenas (inducidas por el hombre) peligrosas en el sistema climático".

Establece que "ese nivel debería alcanzarse en un plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático, asegurar que la producción de alimentos no se vea amenazada y permitir que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible" (7).

En este sentido, el Gobierno del Perú, como otros países dan a conocer a la comunidad nacional e internacional su Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI), en cumplimiento de los compromisos y obligaciones contraídas como parte de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) (8,9). En la elaboración del INGEI, se incluyen las categorías y subcategorías fuentes de emisiones y remociones existentes en el país en las cuales se contó información sobre los de datos de actividad, factores de emisión y los parámetros necesarios para las estimaciones. Es así como, las principales categorías son: Energía, Procesos Industriales y uso de productos, Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra y por último Desechos, cada una de estas tiene subcategorías que las componen, las cuales para el caso del gas que es objeto de análisis totalizan hasta el 2019 unas 78 actividades.

Por otra parte, el análisis de componentes principales (ACP) es una técnica multivariada que se emplea para examinar las relaciones entre varias variables cuantitativas. Permite reducir el número de variables originales disponibles en un pequeño conjunto de combinaciones lineales de las variables originales y brindar una explicación a la estructura de varianza del gran volumen de

información medida (10). Lo cual podría ser útil en el caso que se presenta donde la información objeto de análisis referida a la emisión de CO₂ está contenida en 78 variables.

Inicialmente, PCA fue introducido por Pearson en el contexto de variables no aleatorias y posteriormente extendido a variables aleatorias por Hotelling. Este método permite reducir eficazmente la dimensionalidad de un conjunto de datos al tiempo que conserva la varianza principal. Esta reducción se logra mediante una transformación ortogonal que convierte los datos en un nuevo conjunto de índices, conocidos como CPs, que cumplen dos criterios fundamentales: (i) Cada CP es una combinación lineal de las variables originales. (ii) Los CPs son mutuamente no correlacionados. El primer CP captura la mayor cantidad de información del índice original, y cada CP subsiguiente interpreta la proporción de variabilidad que no ha sido explicada por sus predecesores (11,12).

A partir de los elementos expuestos, el objetivo de esta investigación es examinar las relaciones entre las fuentes de emisiones y remociones de CO₂ utilizadas para la elaboración del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero en el Perú a través de un análisis de componentes principales y clasificación jerárquica.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló mediante un diseño observacional de cohorte retrospectivo según ha descrito Corona y Fonseca (11) en el

2021, donde se analizó la base de datos pública y compilada en el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) desde el año 2000 hasta el 2019 por el Ministerio del Ambiente en Perú, MINAM (8,9).

Proceso de elaboración del inventario nacional de gases de efecto invernadero: El INGEI 2016 ha sido elaborado en el marco del INFOCARBONO bajo la conducción del Ministerio del Ambiente y gracias a la información reportada por el Ministerio de Energía y Minas, el Ministerio de Transportes y Comunicaciones, el Ministerio de la Producción, el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, el Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego y el mismo Ministerio del Ambiente en sus respectivos RAGEI (Reporte Anual de Gases de Efecto Invernadero), MINAM (8,9).

Los RAGEI son inventarios de GEI (Gases de efecto invernadero) sectoriales que se han organizado de acuerdo al alcance de las funciones de cada entidad competente. La integración de todos los RAGEI para la elaboración del INGEI se encuentra a cargo del MINAM, una vez culminado el informe se presenta oficialmente a la CMNUCC y se difunde a nivel nacional a través del Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA) y de la página web INFOCARBONO <https://infocarbono.minam.gob.pe/annios-reportes-sectoriales/2019/>. Asimismo, el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), a través del Anuario de Estadísticas Ambientales, es el encargado de publicar los resultados del INGEI.

Análisis de datos: Los datos fueron compilados del dataset: Tabla-consolidada-INGEI-2019_VF.xlsx, se tomó la información de cada variable en los años 2000, 2005, 2010, 2012, 2014, 2016, 2018, 2019. La información se codificó para facilitar el posterior trabajo con cada variable: Energía=Energ, Actividades de quema de combustibles=AQC-EN, Industrias de energía=IEN-EN, Producción de electricidad y calor como actividad principal=PECAP-EN, Generación de electricidad - SEIN=GE-SEIN-EN, Generación de electricidad - SA= GE-SA-EN.

Generación combinada de calor y energía (CHP)=GCCE-EN, Refinación de petróleo=RP-EN, Fabricación de combustibles sólidos y otras industrias energéticas=FCSIE-EN, Otras industrias de la energía=OIE-EN, Industrias manufactureras y de la construcción=IMC-EN, Minería (con excepción de combustibles) y cantería=MyC-EN, Industria no especificada=InE-EN, Transporte=T-EN, Aviación civil=AC-EN, Transporte terrestre=TT-EN, Automóviles=Aut-EN, Camiones para servicio ligero=CPSL-EN, Camiones para servicio pesado y autobuses=CSPyA-EN, Motocicletas=Motc-EN, Ferrocarriles=Frrc-EN, Navegación marítima y fluvial=NMF-EN, Otro tipo de transporte=OTT-EN, Transporte por tuberías=TTb-EN, Todo terreno=TTrrn-EN, Otros sectores=OSect-EN, Comercial/Institucional=CI-EN, Residencial=Rsd-EN, Agricultura=AGRIC-EN, Pesca=Pesc-EN, No especificado=NEsp-EN, Móvil=Mv-EN, Móviles (componente de aviación)=MvCA-EN, Petróleo y gas natural=PtGN-EN,

Petróleo=Pt-EN, Venteo=VentPt-EN, Quema en antorcha=QmAPt-EN, Todos los demás=TDPt-EN, Producción y refinación=PRPt-EN, Gas natural=GN-EN, Venteo=VentGN-EN, Quema en antorcha=QmAGN-EN, Todos los demás=TDGN-EN, Producción=PDGN-EN, Procesamiento=PcGN-EN, Transmisión y almacenamiento=TAGN-EN, Distribución=DtGN-EN, Procesos Industriales y Uso de Productos=PIUP, Producción de Cemento=PC-PIUP, Producción de Cal=PCal-PIUP, Producción de Vidrio=PV-PIUP, Otros usos de Carbonatos=OUC-PIUP, Cerámicas (ladrillos)=Crmc-PIUP, Otros usos de la Ceniza de Sosa (Carbonato de Sodio)=OUCS-PIUP, Industria química=IQ-PIUP, Producción de Ceniza de Sosa (Carbonato de Sodio)=PCS-PIUP, Producción de Hierro y Acero=PHA-PIUP, Producción de Plomo=PP-PIUP, Producción de Zinc=PZnc-PIUP.

Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra=ASOUT, Tierras forestales=TFrst-ASOUT, Tierras forestales que permanecen como tierras forestales=TFrstPTf-ASOUT, Tierras de cultivo=TCult-ASOUT, Tierras que se convierten en tierras de cultivo=TCTC-ASOUT, Tierras forestales que se convierten en tierras de cultivo=TFCTC-ASOUT, Pastizales que se convierten en tierras de cultivo=PCTC-ASOUT, Pastizales=Pstz-ASOUT, Tierras que se convierten en pastizales=TCPstz-ASOUT, Tierras forestales que se convierten en pastizales=TFCPstz-ASOUT, tierras de cultivo que se convierten en pastizales=TCulCPstz-ASOUT, Asentamientos=Asent-ASOUT, Tierras que se convierten en asentamientos=TCAsent-

ASOUT, Tierras forestales que se convierten en asentamientos=TFCAsent-ASOUT, Tierras de cultivo que se convierten en asentamientos=TCCAsent-ASOUT, Pastizales que se convierten en asentamientos=PstzCAsent-ASOUT, Otras tierras=OT-ASOUT, Tierras que se convierten en otras tierras=TCOT-ASOUT, Tierras de cultivo que se convierten en otras tierras=TCCOT-ASOUT, Pastizales que se convierten en otras tierras=PstzCOT-ASOUT, Aplicación de urea=Aurea-ASOUT, Desechos=DES, Incineración abierta de desechos=IAD-ASOUT.

Seguidamente se realizó el análisis comparativo de la emisión de CO₂ en todo el período entre los sectores generales en que clasifica el INGEI su información: Energía, Procesos Industriales y uso de productos, Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra y por último Desechos a través de la prueba de distribución libre de Kruskal-Wallis para la comparación de muestras múltiples, el nivel de significación se estableció para $p < 0.05$.

Posteriormente se realizó un análisis de componentes principales (ACP) el cual es una técnica multivariada que se emplea para examinar las relaciones entre varias variables cuantitativas (12) su aplicación se realizó con el fin de reducir la dimensionalidad de los datos e identificar qué combinaciones de variables pueden conformar un patrón característico de emisión de CO₂ en las diferentes clasificaciones que se le brindan en el INGEI. En este sentido fueron graficadas las primeras dos componentes

una vez que el primer CP tiene la mayor varianza de cualquier combinación lineal de las variables observadas. Según (13), la mayor parte de la varianza de los datos es explicada por los componentes principales y el número de componentes nos indica la existencia o no de diversidad en la respuesta estudiada, en el caso que se investiga referente a las emisiones de CO₂. Además, fue estimado el porcentaje de varianza explicada por cada componente principal y la contribución de cada variable a cada componente, este análisis fue realizado a partir de la librería (factoExtra) (14).

Posteriormente la información se subdividió en dos clusters mediante aprendizaje automático no supervisado para identificar puntos de datos similares (agrupaciones naturales). Para esto se ejecutó un análisis de determinación del número óptimo de cluster a través de la librería (NbClust) y posteriormente se utilizó el procedimiento de Agrupación Jerárquica sobre Componentes Principales utilizando la función HCPC de la librería (FactoMineR) (15), en el entorno de programación R (R Statistics, versión 4.0.5, Inc, Colorado, USA). Este análisis no solo permite identificar la jerarquía en la importancia de las variables que describen la variabilidad de la muestra sino también perfilar un conjunto de observaciones al asociarlo con variables que tienen el mayor efecto dentro de cada conglomerado para describir la distribución en el espacio.

Luego de creado los cluster se identificaron dentro de cada uno los individuos que los conforman y se creó un nuevo dataset, los datos dentro fueron comparados a través de prueba de hipótesis de t, el nivel de significación se estableció para $p < 0.05$. Fue utilizado el software R versión 4.3.2 (2023-10-31) -- "Eye Holes" Copyright (C) 2023.

RESULTADOS

La emisión de CO₂ a la atmósfera tiene dentro de sus impactos negativos su contribución al calentamiento global del planeta. En la Figura 1, muestra las medianas de gigagramos de dióxido de carbono (GgCO₂) que se han producidos en Perú por los principales sectores económicos en que se estructura la información emitida en el informe del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero. Los resultados muestran que los sectores relacionados con la Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra (ASOUT) son los que más generan CO₂ a la atmósfera en el período comprendido entre el año 2000 y el 2019. Una prueba de comparación múltiple de Kruskal-Wallis se realizó dando como resultados diferencias significativas para $p < 8.291e-05$ entre los valores observados, siendo así, sigue en importancia las instituciones correspondientes al sector de producción de Energía (EN) y le siguen, aunque sin diferir entre ellos las actividades correspondientes a Procesos Industriales y Uso de Productos (PIUP) y finalmente aquellas dirigidas a la eliminación de Desechos (DES).

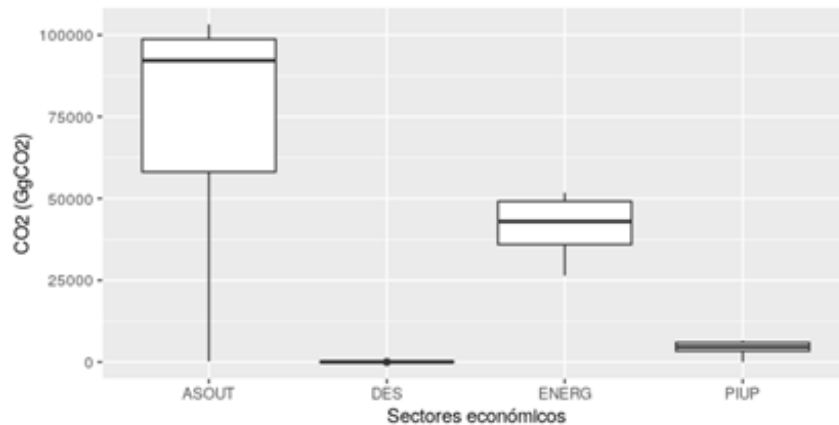


Figura 1. Emisión de CO₂ por diferentes sectores generales de la economía en el período de 2000-2019.

La estructura de la varianza total de las emisiones de CO₂ en Perú en el período del año 2000-2019 se muestra en la Tabla 1. En este análisis se emplearon un total de 78 variables (sectores de la economía) en las cuales se estructura el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero. El análisis de componentes principales aplicado permitió reducir la información disponible a solo siete componentes principales. En este sentido, los valores propios

(Eigenvalue) se pueden utilizar para determinar la cantidad de componentes principales que se deben retener. Un valor propio mayor que 1 indica que el componente principal representa más varianza que la contenida en una de las variables originales (16), en el caso que se evalúa el CP7 presenta un valor propio mayor de 1, el porcentaje acumulado explicado de la varianza total por cada componente principal explica el 100% del comportamiento de la varianza total.

Tabla 1. Componentes principales según sectores de la economía para la emisión de CO₂ en Perú.

Componentes principales	Eigenvalue	Porcentaje explicado de la varianza total por cada componente principal	Porcentaje acumulado explicado de la varianza total por cada componente principal
Dim.1	38.8357	49.7894	49.7894
Dim.2	19.8673	25.4710	75.2604
Dim.3	7.2043	9.2363	84.4968
Dim.4	5.0747	6.5061	91.0029
Dim.5	3.1564	4.0467	95.0497
Dim.6	2.1706	2.7828	97.8325
Dim.7	1.6905	2.1674	100.0000

Como es esperado en este tipo de análisis el mayor porcentaje explicado de la varianza total les corresponden a las dos primeras CP, siendo 48.2% y 25.7% respectivamente Figura 2.

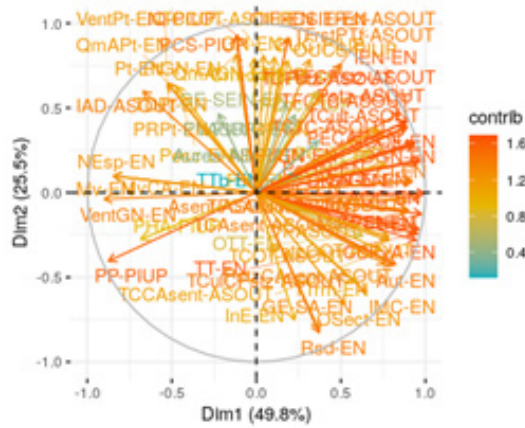


Figura 2. Primera dos componentes principales y contribución de cada sector a la emisión de CO₂ en Perú, 2000-2019.

Como se mostró arriba las cinco primeras CP explican el 94.89%. En la Figura 2 se muestra un resumen de los 10 primeros sectores que más contribuyen en las cinco primeras CP. Así, para la CP1, las 10 primeras actividades pertenecientes al sector pertenecen la Energía (EN): Actividades de quema de combustibles (AQC-EN), Motocicletas (Motc-EN), Distribución (DtGN-EN), Aviación civil (AC-EN), Transporte (T-EN), Transmisión y almacenamiento (TAGN-EN), Transporte terrestre (TT-EN), Camiones para servicio pesado y autobuses (CSPyA-EN), Generación combinada de calor y energía (CHP) (GCCE-EN) y Camiones para servicio ligero (CPSL-EN) (Figura 2. CP1(a))

En la CP2 las 10 primeras actividades que más contribuyen pertenecen al sector Energía (EN) y Procesos Industriales y Uso de Productos (PIUP): Industria química (IQ-PIUP), Producción de Ceniza de Sosa (Carbonato de Sodio) (PCS-PIUP), Fabricación de combustibles sólidos y

otras industrias energéticas (FCSIE-EN), Otras industrias de la energía (OIE-EN), Residencial (Rsd-EN), Tierras de cultivo que se convierten en otras tierras (TCCOT-ASOUT), Petróleo y gas natural (PtGN-EN), Quema en antorcha (QmAGN-EN), Generación de electricidad-SA (GE-SA-EN) y Gas natural (GN-EN).

En la CP3 las 10 primeras actividades que más contribuyen pertenecen a los sectores Procesos Industriales y Uso de Productos (PIUP) y Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra (ASOUT): Producción de Vidrio (PV-PIUP), Producción de Hierro y Acero (PHA-PIUP), Producción de Cal (PCal-PIUP), Producción de Cemento (PC-PIUP), Aplicación de urea (Aurea-ASOUT), Cerámicas (ladrillos) (Crmc-PIUP), Producción de Zinc (PZnc-PIUP), Otros usos de Carbonatos (OUC-PIUP), Ferrocarriles (Frrc-EN) y Otras tierras (OT-ASOUT).

En la CP4 las 10 primeras actividades que más contribuyen pertenecen a los sectores Energía (EN) y Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra (ASOUT): Transporte por tuberías (TTb-EN), Generación de electricidad-SEIN (GE-SEIN-EN), Otro tipo de transporte (OTT-EN), Industria no especificada (InE-EN), Navegación marítima y fluvial (NMF-EN), Industrias manufactureras y de la construcción (IMC-EN), Producción de Cemento (PC-PIUP), Petróleo y gas natural (PtGN-EN), Todo terreno (TTrn-EN) y Todos los demás (TDPT-EN).

En la CP5 las 10 primeras actividades que más contribuyen pertenecen a los sectores Energía (EN), Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra (ASOUT) y Procesos Industriales y Uso de Productos (PIUP): Agricultura (AGRIC-EN), Refinación de petróleo (RP-EN), Pesca (Pesc-EN), Tierras de cultivo que se convierten en otras tierras (TCCOT-ASOUT), Producción de Vidrio (PV-PIUP), Aplicación de urea (Aurea-ASOUT), Pastizales que se convierten en tierras de cultivo (PCTC-ASOUT), Automóviles (Aut-EN), Otros usos de la Ceniza de Sosa (Carbonato de Sodio) (OUCS-PIUP) y Venteo (VentGN-EN).

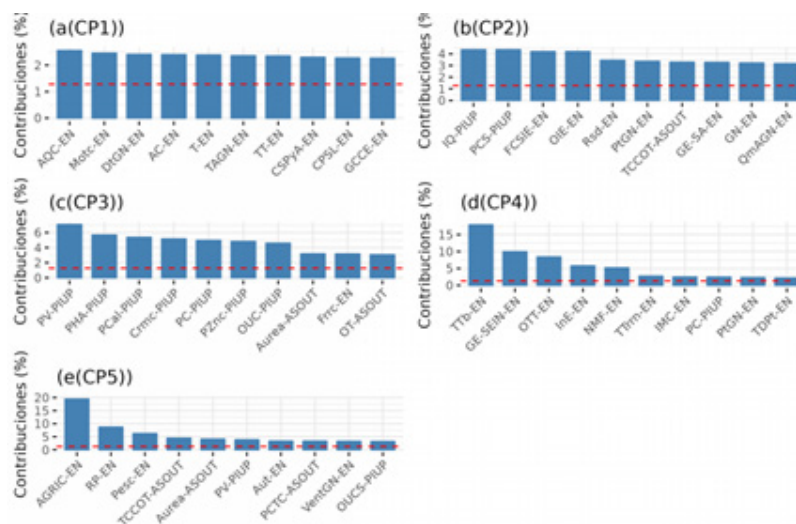


Figura 3. Contribución de las actividades que se realizan en cada uno de los sectores a los componentes principales (CP)

El método más popular para determinar el número óptimo de cluster es el índice de silhouette (silueta). Cuanto mayor sea el valor que

tome será mejor valorado y seleccionado como el valor óptimo. Al aplicar este método dos cluster fue el resultado final Figura 4.

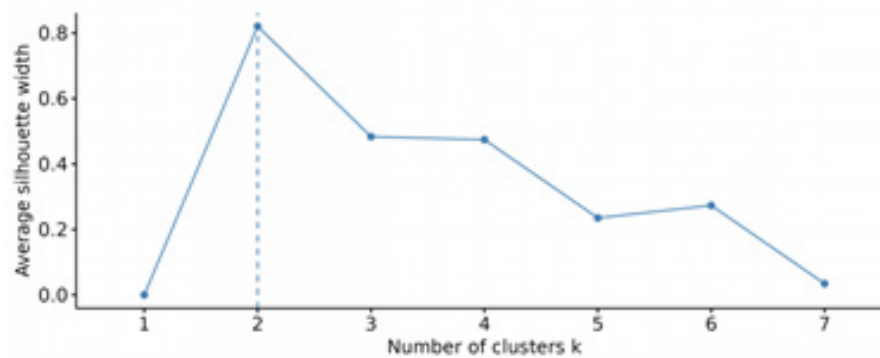


Figura 4. Número óptimo de cluster.

Leyenda: El término "average silhouette width" se traduce al español como "ancho promedio de la silueta". La medida de ancho promedio de la silueta se utiliza para evaluar la cohesión y separación de los clusters en un conjunto de datos. Esta métrica proporciona información sobre qué tan bien cada punto de datos se ajusta a su cluster asignado en comparación con otros clusters, lo que ayuda a

identificar el número óptimo de clusters para un análisis de clustering efectivo.

Al aplicar un análisis de Agrupación Jerárquica sobre Componentes Principales fueron identificados dos cluster. En este caso, los resultados sugieren que los datos se agrupan en dos grupos distintos, lo que puede ser útil para la interpretación y la comprensión de las relaciones entre los años y las variables medidas.

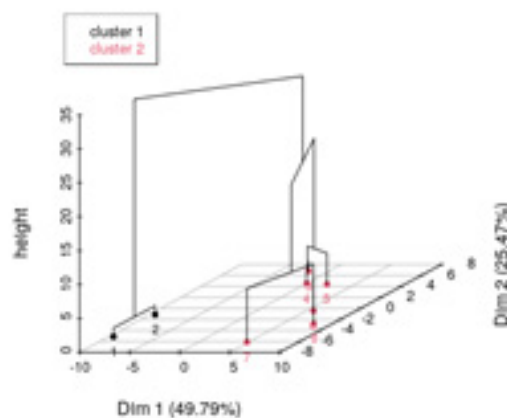


Figura 5. Análisis de cluster jerárquico sobre componentes principales.

Legenda: El término "height" se refiere a la altura del árbol en el contexto de la formación de clusters. En este análisis, la altura representa la medida de similitud o disimilitud entre los clusters formados a partir de los datos. La altura indica la distancia en la cual se unen o separan los clusters.

El cluster uno agrupó los valores de las variables evaluadas correspondientes para los dos primeros años (2000 y 2005), estos tuvieron como característica principal en que para esos años no se hicieron mediciones en las siguientes variables: GCCE-EN, TFrst-ASOUT, TFrstPTf-ASOUT, TCult-ASOUT, TCTC-ASOUT, TFCTC-ASOUT, PCTC-ASOUT, Pstz-ASOUT, TCPstz-ASOUT, FCPstz-ASOUT,

TCulCPstz-ASOUT, Asent-ASOUT, TCAsent-ASOUT, TFCAsent-ASOUT, TCCAsent-ASOUT, PstzCAsent-ASOUT, OT-ASOUT, TCOT-ASOUT, TCCOT-ASOUT, PstzCOT-ASOUT.

Los valores de emisión de CO₂(GgCO₂) generados por ambos cluster (Figura 6) no mostraron diferencias significativas. Un análisis adicional de t de Student para la comparación de dos promedios corroboró los mismos resultados, no se presentaron diferencias significativas entre las series de la emisión de CO₂(GgCO₂) en ambos cluster (promedio cluster uno: 3392.068 CO₂(GgCO₂), promedio cluster dos: 5644.587 CO₂(GgCO₂) t = -1.6459, p-value = 0.1012).

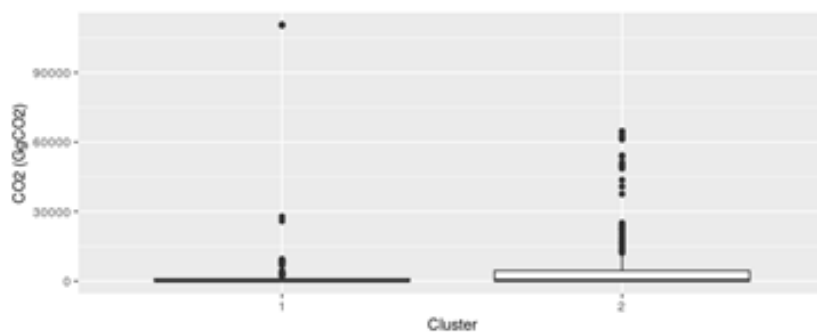


Figura 6. Diferencias entre cluster.

DISCUSIÓN

Los resultados de la emisión de CO₂ en Perú revela que los sectores relacionados con la Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra (ASOUT) son los principales generadores de CO₂ en el período entre 2000 y 2019. Estos hallazgos se respaldan con una prueba de comparación múltiple de Kruskal-Wallis que mostró diferencias significativas entre los valores observados,

destacando la importancia del sector ASOUT en las emisiones de CO₂. A su vez, se identificó que las instituciones correspondientes al sector de producción de Energía (EN) ocupan un lugar relevante en la generación de CO₂, seguidas por las actividades relacionadas con Procesos Industriales y Uso de Productos (PIUP), y finalmente, las dirigidas a la eliminación de Desechos (DES). Estos resultados subrayan la necesidad de abordar

estrategias específicas para mitigar las emisiones de CO₂ en los sectores identificados como los principales contribuyentes. Es fundamental implementar medidas que promuevan prácticas sostenibles en la agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra, así como en la producción de energía y el manejo de desechos para reducir el impacto negativo en el calentamiento global y el medio ambiente. La información proporcionada por el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero ofrece una base sólida para orientar políticas y acciones destinadas a combatir el cambio climático y mejorar la calidad ambiental en Perú.

En este sentido, las emisiones de CO₂ representan una externalidad vinculada al incremento de la actividad económica y al crecimiento poblacional en los países. Un ejemplo de esto es el caso de Perú, donde en 1990 se emitieron 20,9 miles de toneladas métricas (TM) de CO₂, cifra que aumentó a 53,3 mil TM en 2019. Durante este periodo, la economía peruana experimentó un crecimiento del 261%, mientras que la población solo aumentó un 46%. Por lo tanto, el aumento de las emisiones parece estar más relacionado con el crecimiento del PIB que con la evolución demográfica (2).

Para Mulder (17) en 2021, además de las emisiones antropogénicas, es necesario considerar brevemente la producción natural de CO₂ y en qué medida estas dos fuentes de carbono podrían contribuir al CO₂ que ingresa en la atmósfera. El calentamiento global, impulsado por el CO₂

antropogénico, está aumentando rápidamente la ocurrencia de eventos de incendios naturales. Las emisiones de CO₂ por incendios forestales y matorrales en 2019 fueron > 10% más altas que la mención anual de que su capa superior del suelo formada en millones de años tiene un stock total de carbono de solo 25 Gt. Sus resultados muestran claramente que los incendios y los biomas están interrelacionados, con incendios forestales comunes en el bioma de sabana. Ya que las frecuencias de incendios difieren significativamente entre biomas ($P = 0.003$) pero no entre regiones biogeográficas ($P = 0.460$). Además de Australia, en 2019 las regiones biogeográficas más afectadas estaban en África (Sur y Norte de África, emitiendo 2.22 y 1.05 Gt de CO₂, respectivamente) y en América Latina (emitiendo 1.00 Gt de CO₂).

La estructura de la varianza total de las emisiones de CO₂ en Perú entre 2000 y 2019 se analizó utilizando un total de 78 variables que representan los sectores económicos del país, según el INGEI. Mediante el análisis de componentes principales, se logró reducir la información a siete componentes principales. Estos resultados sugieren que la información contenida en las 78 variables originales se puede resumir eficazmente en siete componentes principales, lo que simplifica la interpretación y comprensión de las emisiones de CO₂ en Perú durante el período estudiado.

En general, plantea Sun (18) en el 2017, se puede observar en diversos estudios que la

selección adecuada de factores influyentes tiene una influencia significativa en los resultados de predicción de las emisiones de CO₂. Sin embargo, la mayoría de los autores solo hacen hincapié en el impacto de estos factores en las emisiones totales de CO₂ y pasan por alto la correlación entre ellos. En realidad, existen superposiciones de información contenida en los datos, por lo que el empleo del análisis de componentes principales (PCA) para reducir la dimensión de los factores influyentes preseleccionados con la retención de información al máximo, posibilita la simplificación de la información, la eficiencia operativa y la precisión de procesos de predicción pueden mejorarse significativamente.

Los resultados revelan que las cinco primeras componentes principales (CP) explican el 94.89% de la varianza total. En la CP1, se destacan actividades clave del sector de Energía (EN) como Actividades de quema de combustibles, Motocicletas, Distribución, Aviación civil, Transporte, Transmisión y almacenamiento, entre otros. Así mismo, una de las principales actividades producidas por el ser humano que emite CO₂ es la combustión de combustibles fósiles esto es conforme al carbón, gas natural y petróleo para generar lo que es la energía y con la finalidad de transporte, aunque ciertos procesos industriales y cambios en el uso de la tierra también emiten CO₂ (19).

Los resultados mostrados en este trabajo coinciden con los reportados previamente por Jiménez-Martínez (10) en el 2014, quien asegura

que desde el punto de vista tecnológico, el análisis de componentes principales soportado en dos planos factoriales explican el 57,94% de la información, lo cual los hace significativos, donde el plano uno indica una correlación directa de las variables emisiones de CO₂ por emisiones de combustibles a gas, emisiones de CO₂ del consumo de combustible líquido (kilotoneladas), emisiones de CO₂ del consumo de combustibles sólidos (kilotoneladas), indicando que desde el punto de vista tecnológico solo los aspectos de emisiones denotan significancia con respecto a alteraciones de cambio climático para América Latina, mientras que el factor dos se asocia con la producción de electricidad y consumo de energía eléctrica, apreciándose que el consumo de energía eléctrica así como su producción son aspectos que presionan hacia la generación de emisiones de CO₂.

Por otro lado, la CP2 resalta actividades significativas de los sectores Energía (EN) y Procesos Industriales y Uso de Productos (PIUP), como Industria química, Producción de Ceniza de Sosa y Fabricación de combustibles sólidos. En cuanto a la CP3, sobresalen actividades relevantes de los sectores Procesos Industriales y Uso de Productos (PIUP) y Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra (ASOUT), como Producción de Vidrio y Producción de Hierro y Acero. En las CP4 y CP5, se evidencia una combinación de actividades de los sectores Energía (EN), Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra (ASOUT), así como Procesos Industriales y Uso de Productos (PIUP),

destacando áreas como Transporte por tuberías, Generación de electricidad-SEIN y Refinación de petróleo. Estos resultados subrayan la relevancia de estos sectores en las emisiones de CO₂ en Perú durante el período analizado, enfatizando la urgencia de implementar medidas específicas para reducir estas emisiones en sectores clave como la energía, la industria y la agricultura.

Además, autores como García (20) en el 2021, han resaltado la necesidad de implementar medidas específicas en sectores como la energía, la industria y la agricultura para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. El estudio realizado por Zevallos y Lavado-Casimiro (21) en el 2022, también respalda la relevancia de los resultados presentados, ya que enfatizan la urgencia de abordar las emisiones de CO₂ en sectores específicos para mitigar el impacto ambiental. Estos hallazgos coinciden con investigaciones previas realizadas por Sosa-Rodríguez (22) en el 2019, quienes han demostrado la importancia de identificar y priorizar acciones en sectores como la agricultura para combatir el cambio climático.

CONCLUSIONES

La aplicación del análisis de componentes principales permitió identificar patrones significativos en los datos resultantes de la clasificación de las fuentes y sumideros generadores de emisiones de dióxido de carbono en diferentes sectores económicos del país. Siendo el primer componente principal integrado por variables del sector de la Energía y el segundo por fuentes

de los sectores Energía y Energía (EN) y Procesos Industriales y Uso de Productos (PIUP). Estos dos CP son los más importante en la explicación de la varianza total del comportamiento de las Emisiones de CO₂ en Perú en el período estudiado. Esta reducción dimensional facilita la toma de decisiones informadas para abordar eficazmente las emisiones de CO₂ y promover prácticas más sostenibles en Perú.

CONFLICTO DE INTERESES. Los autores declaran que no existe conflicto de intereses para la publicación del presente artículo científico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Raihan A, Tuspekova A. The nexus between economic growth, renewable energy use, agricultural land expansion, and carbon emissions: New insights from Peru. *Energy Nexus*. 2022; 6:100067. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772427122000304>
2. Chirinos R. ¿Cuánto contamina el Perú y que se hace al respecto? *Moneda - Medio Ambient*. 2021;(188):60–4. <https://www.bcrp.gob.pe/docs/Publicaciones/Revista-Moneda/moneda-188/moneda-188-12.pdf>
3. Leitão N. Testing the Role of Trade on Carbon Dioxide Emissions in Portugal. *Econ* 2021, 2021;9(1):22. <https://www.mdpi.com/2227-7099/9/1/22/htm>
4. Quiroga R, Agacino R, Malmierca A, del Villar S, Ocampo R. La pérdida de los bosques de América Latina y el Caribe 1990-2020: evidencia estadística. *Temas Estadísticos de la CEPAL*. 2020. 1–9. <https://fra-platform.herokuapp.com/>
5. Awmack C, Woodcock C, Harrington R. Climate change may increase vulnerability of aphids to natural enemies. *Ecol Entomol*. 1997;22(3):366–8. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1046/j.1365-2311.1997.00069.x>

6. Pinedo-Jáuregui C, verano-Cachay J, Barrantes-Santos V. Análisis del control de emisiones atmosféricas vehiculares en Lima metropolitana. *South Sustain.* 2020; 1(1):e005–e005. <https://revistas.cientifica.edu.pe/index.php/southsustainability/article/view/598>
7. ONU. Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático. 1992. <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>
8. MINAM. INGEI 2016: Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero del año 2016 y actualización de las estimaciones de los años 2000, 2005, 2010, 2012 y 2014. Normativa. 2021. 36–86. <http://www.ambiente.gob.ec/el-ministerio/>
9. MINAM. Segundo Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Lima-Perú; 2019. <https://unfccc.int/documents/204739>
10. Jiménez-Martínez JA, Mejía LM. Multivariate Stochastic Analysis CO2 emission factor for carbon sequestration and sustainable development for Colombia. *UGCiencia.* 2014;20:64–71. <https://core.ac.uk/download/pdf/268087839.pdf>
11. Corona L, Fonseca H. Acerca del carácter retrospectivo o prospectivo en la investigación científica. *Medisur.* 2021;19(2):338–41. <http://medisur.sld.cu/index.php/medisur/article/view/4501>
12. Molina-Molina O, Monteros-Pérez E. Rotación en análisis de componentes principales categórico: un caso práctico. *Met Encuestas.* 2010; 12:63–88. <https://digital.csic.es/handle/10261/42768>
13. Cardozo L, Reina-monroy J, Florez-escobar W, Peña-ibagón J, Cas- C, Bonilla D. Autoconcepto físico en estudiantes universitarios: Generación de perfiles por clasificación jerárquica sobre componentes principales principal components. *Retos.* 2023; 48:167–77. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8772363>
14. Kassambara A, Mundt F. Package ‘factoextra’. 2020. 3–83. <http://www.sthda.com/english/rpkgs/factoextra>
15. Le S, Josse J, Husson F. FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. *J Stat Softw.* 2008;25(1):1–18. <https://www.jstatsoft.org/v25/i01/>
16. Zuluaga R, Delahoz-Domínguez E, Hoolyana O. Eficiencia académica estudiantil: un enfoque de análisis de componentes principales y análisis envolvente de datos. *Ingeniare.* 2021;16(29):27–40. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8051528>
17. Mulder C, Conti E, Mancinelli G. Carbon budget and national gross domestic product in the framework of the Paris Climate Agreement. *Ecol Indic.* 2021; 130:108066. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X21007317>
18. Sun W, Sun J. Prediction of carbon dioxide emissions based on principal component analysis with regularized extreme learning machine: The case of China. *Environ Eng Res.* 2017 Sep 1;22(3):302–11. <https://www.eeer.org/journal/view.php?number=842>
19. Chen W, Lei Y. The impacts of renewable energy and technological innovation on environment-energy-growth nexus: New evidence from a panel quantile regression. *Renew Energy.* 2018 1; 123:1–14. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148118301708>
20. García S, Vega M, Mora M. Experiencias incipientes de inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero en el ámbito local en Costa Rica. *Rev Ciencias Ambient.* 2021;55(1):186–210. <https://doi.org/10.15359/rca.55-1.9>
21. Zevallos J, Lavado-Casimiro W. Climate Change Impact on Peruvian Biomes. *Forests.* 2022;13(2):238.: <https://www.mdpi.com/1999-4907/13/2/238>
22. Sosa-Rodrigues B, García-Vivas Y. Emission of greenhouse gases in the soil under the green manure effect. *Agron Mesoam.* 2019;30(3):767–82. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/am/v30n3/2215-3608-am-30-03-00767.pdf>