



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE ARQUITECTURA Y URBANISMO



**DISEÑO DE CICLOVÍAS RESILIENTES EN PUNO, PERÚ:
COMBATIENDO LAS EMISIONES DE CO₂ URBANAS CON
ANÁLISIS SIG**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. LUZ CLARA CALISAYA ROJAS

Bach. JUAN NIHOL BRAVO INCHUÑA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

ARQUITECTO

PUNO – PERÚ

2024



Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO

**DISEÑO DE CICLOVÍAS RESILIENTES EN
PUNO, PERÚ: COMBATIENDO LAS EMISI
ONES DE CO₂ URBANAS CON ANÁLISIS
SIG**

AUTOR

**LUZ CLARA CALISAYA ROJAS - JUA
N NIHOL BRAVO INCHUÑA**

RECuento DE PALABRAS

12547 Words

RECuento DE CARACTERES

68398 Characters

RECuento DE PÁGINAS

72 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

3.4MB

FECHA DE ENTREGA

Sep 23, 2024 10:02 AM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Sep 23, 2024 10:03 AM GMT-5

● 9% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 8% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 5% Base de datos de trabajos entregados
- 5% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Fuentes excluidas manualmente
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 9 palabras)

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA DE
CONSTRUCCIÓN Y URBANISMO
CAP. 14636

Mg. Arq. José A. Llano Condori
COORDINADOR SUB DIRECCION DE INVESTIGACION



DEDICATORIA

El artículo científico lo dedico con mucho amor y cariño a mis padres Vicente Bravo y Maria Inchuña, quienes me motivaron a estudiar en la UNAP siguiendo sus pasos, lo cual no me arrepiento en lo más mínimo es más agradezco que gracias a esta alma mater se ha podido culminar esta investigación científica.

Dedico este artículo científico a la escuela de ARQUITECTURA Y URBANISMO, no quería hacer una tesis, quería realmente aterrizar una investigación aplicada y publicada que nos llevó años maquetarla y aplicarla, en agradecimiento a la escuela que me brindo conocimiento en las aulas y pasillos.

Al Arq. Mirko Llamosa por darme una introducción a la investigación mediante SIG, a mi carrera de GEOMATICA que me brindo los conocimientos prácticos y teóricos en la aplicación para este artículo científico. Al Ing. Kevin que me ayudo a entender la importancia y vinculación de Geomática con Arquitectura.

Al Arquitecto y Asesor Grover Mamani Marin quien nos apoyó en todo el proceso



*de la investigación, culminación y publicación del
artículo.*

Te lo dedico a ti de corazón Luz

LCCR.

Juan Nihol Bravo Inchuña.



DEDICATORIA

Este artículo científico fruto de nuestro esfuerzo y constancia va dedicado con todo mi corazón a mis dos seres amados mi madre Irma Victoria Rojas Huerta y mi padre Augusto Calisaya Quispe por el apoyo y el amor incondicional que me brindaron y por inculcarme los valores morales y espirituales. Madre gracias por ser un pilar de fortaleza y ejemplo e inspiración.

A ti mi dios Jehová por guiarme y cuidarme en este camino.

A nuestro asesor Arquitecto Marín Mamani Grover, por el apoyo y el tiempo que nos brindó para culminar este proyecto de investigación.

A ti Nihol JNBI te lo dedico de corazón.

Luz Clara Calisaya Rojas.



AGRADECIMIENTO

A Dios, por darnos la fuerza, a nuestros padres por darnos el apoyo moral y económico para terminar un ciclo más de esta etapa profesional.

A nuestro asesor Arquitecto Grover Marín Mamani que nos brindó sus conocimientos para base de nuestra formación y culminación de esta investigación.

Luz Clara Calisaya Rojas

Juan Nihol Bravo Inchuña



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	3
DEDICATORIA	5
AGRADECIMIENTO	6
ÍNDICE GENERAL	7
ÍNDICE DE FIGURAS	8
ÍNDICE DE ACRÓNIMOS.....	8
CARTA DE ACEPTACIÓN DE PUBLICACIÓN	10
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	11
CAPÍTULO II. ARTICULO ACEPTADO	16
ANEXOS	38
ANEXOS 1: INFORMACIÓN DE LA REVISTA	38
ANEXOS 2: TRADUCCIÓN AL ESPAÑOL.....	40
ANEXOS 3: ARTICULO PUBLICADO	62



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa final de antecedentes de contaminación del aire, (a) resultados de CO + VHHD + CO ₂ + Ruido, (b) nuevos puntos de monitoreo.....	47
Figura 2: (a) Mapa de puntos monitoreados, (b) Densificación del nivel de CO ₂ en la ciudad de Puno.....	51
Figura 3: (a) Mapa de 9 nodos críticos de mayor contaminación por CO ₂ en Puno, (b) Mapa promedio (mañana, tarde, noche) de 9 nodos críticos de mayor contaminación por CO ₂ en Puno.....	53
Figura 4: (a) Mapa de nodos con mayor ARS, (b) Mapa de variables interpoladas y red de carreteras.....	55

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

GIS	: Geographic Information System (Sistema de Información Geográfica).
CO ₂	: Carbon Dioxide (Dióxido de Carbono).
ARS	: Affluence of Recreational Spaces (Afluencia de Espacios Recreativos).
WMO	: World Meteorological Organization (Organización Meteorológica Mundial).
IPCC	: Intergovernmental Panel on Climate Change (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático).
BNAC	: Base Nationale des Aménagements Cyclables (Base Nacional de Datos de Infraestructuras Ciclistas).
CO	: Monóxido de Carbono (Carbon Monoxide).
VHMD	: Volumen Horario de Máxima Demanda Afluencia Vehicular (Hourly Volume of Maximum Demand of Vehicular Influx).



GPS : Sistema de Posicionamiento Global (Global Positioning System)



CARTA DE ACEPTACIÓN DE PUBLICACIÓN

De acuerdo con la base del reglamento de titulación alternativa, se realizó la tesis en formato artículo científico para su revisión y aceptación a la revista IJAAS (International Journal of Advanced and Applied Sciences - Taiwan) esta indexada en SCOPUS – Q4 <https://www.scopus.com/sourceid/21101045271#tabs=0>, la cual la investigación fue aceptada luego de una estricta valoración, agregando que la revista solo acepta artículos en inglés, se presentó en ese idioma. Mas adelante, se presenta la carta de aceptación por parte de la revista indexada.



Title: Resilient Bikeway Networks and Autopoietic Connectivity in Recreational Spaces in the Urban Landscape of Puno

Authors: Juan Nihol Bravo Inchuña¹, Luz Clara Calisaya Rojas ², Grover Marin Mamani³

Affiliation: *1Academic Department of Architecture and Urbanism. Faculty of Civil Engineering and Architecture, Universidad Nacional del Altiplano de Puno, Perú; auaceniho@gmail.com*
2Academic Department of Architecture and Urbanism. Faculty of Civil Engineering and Architecture, Universidad Nacional del Altiplano de Puno, Perú; claritarojas.tj@gmail.com
3Academic Department of Architecture and Urbanism. Faculty of Civil Engineering and Architecture, Universidad Nacional del Altiplano de Puno, Perú; gmarin@unap.edu.pe

Dear Authors,

Your manuscript has now been accepted for publication in International Journal of Advanced and Applied Sciences and will be printed in **next Issues**.

Additionally, within the next **8 weeks** you will receive the proofs of your paper. Please do check them carefully for any misprints or errors.

Yours Sincerely,

Jan-22 2024
Cheng-Ta Yeh,
Editor-in-Chief
IJAAS



CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

El presente artículo de investigación se enfoca en analizar la contaminación por dióxido de carbono (CO₂) emitido por vehículos motorizados en la ciudad de Puno, Perú y el diseño de rutas de bicicletas resilientes para combatir la contaminación urbana de CO₂. Utilizando el análisis del Sistema de Información Geográfica (SIG).

El dióxido de carbono es un gas de efecto invernadero producido principalmente por el uso frecuente de vehículos motorizados, la principal fuente de contaminación en el área urbana. La comunidad científica ha reconocido al CO₂ como el principal contribuyente del cambio climático desde 1863 y desde 1979 se responsabilizó del aumento de la contaminación. Investigaciones han demostrado que la quema del combustible fósil es la causa del calentamiento global. Además, se ha observado un incremento de la temperatura media con picos registrados en diferentes años. América Latina tiene uno de los peores índices de contaminación atmosférica. Perú ocupa el puesto 21 en contaminación atmosférica, siendo Lima la capital con un gran consumo de combustible fósil, afectando principalmente el estado físico y mental de los limeños. Un estudio realizado mediante encuestas dio que el 51.3% de los limeños considera que la calidad de vida no es buena a causa de la congestión vehicular. En la región de Puno donde se desarrolló esta investigación, el parque automotor está conformado por una variedad de vehículos, especialmente en la urbe de Puno. En el año 2000 existían 13,33 vehículos por cada 1.000 habitantes, y en el año 2001 el parque se incrementó a 27,17 vehículos por cada 1.000 habitantes, lo que representa un aumento de 2,04 vehículos. En la actualidad, movilizarse en vehículos motorizados es la opción número uno, por la comodidad que ofrece este medio de transporte a cada individuo, entre otros; el vehículo no motorizado (movilidad sostenible) no es una opción para movilizarse por falta del plan integrado de ciclovías en la ciudad de Puno. En Puno, el 62% de los hogares realizaba el uso de bicicletas, pero en



los años siguientes el uso de las bicicletas fue desplazado por falta de equipamiento de ciclovías y crecimiento del parque automotor. Asimismo, investigaciones realizadas en la urbe de Puno datan del crecimiento del parque automotor, basadas en estudios de contaminación acústica de vehículos motorizados y el monitoreo de CO₂ y CO que fueron utilizados para el desarrollo de la investigación.

Por lo tanto, los medios de movilidad sostenible, bicicletas, ciclovías y scooter son menos agresivos para el medio ambiente y para el mejor control del calentamiento global y reducir menos riesgos de salud para las personas. Una de las estrategias modelo para el desplazamiento del transporte y el crecimiento del parque automotor para la priorización del uso de movilidad sostenible se interrelaciona con un componente específico de conexión social entre el ser humano. Un estudio de diseño de ciclorrutas con destino turístico demuestra que este tipo de movilidad sostenible contribuye a la reducción de la contaminación atmosférica y al desarrollo económico. Ya que el humano es un ser social, en este componente se prioriza esa misma interrelación social, para aprovechar los desplazamientos obligatorios a espacios de recreación pasiva y activa, generando hacia una red ciclovías resilientes y autopoéticas.

Debido al incremento del CO₂, siendo una amenaza para el cambio climático de la tierra y del ser vivo, esta investigación realizó el análisis de la primera variable de CO₂ con el monitoreo de 47 puntos en unidades de ppm, se determinó el nivel total de CO₂ de la ciudad de Puno y se identificaron 9 nodos más críticos. Asimismo, se evaluó la segunda variable ARS (afluencia de espacios recreativos) donde se encuestaron 22 parques y se realizó la interpolación de las variables CO₂ y ARS. La metodología utilizada fue observacional, retrospectiva, analítica y transversal, permitiendo medir la variable de CO₂ con una interpolación de espacios recreativos mediante mapas de Sistemas de Información Geográfica SIG. Este sistema SIG nos ayudó a insertar y gestionar diversos



tipos de datos y resultados obtenidos de los monitoreos y encuestas de las dos variables, representados en mapas. Para la obtención de estos mapas se analizó con el software QGIS y el método de densidad Kernel. Generando así patrones vecinos para el cálculo de densidad de estos datos de monitoreo con un ancho de banda y con el análisis de álgebra de mapas se realizó la interpolación de datos parciales con las herramientas de geoprocésamiento SIG. Asimismo, se realizó recopilación de datos de años anteriores de muestreo de CO₂, lo que permitió definir las zonas con más contaminación donde generara una identificación de una ratio para el monitoreo puntual de CO₂. Posteriormente se zonificaron zonas de mayor contaminación; el periodo duró 9 meses de monitoreo de agosto 2022 a mayo 2023, excluyendo los meses sin monitoreo de diciembre 2022, enero y febrero 2023 debido a la convulsión social que afectó al país y a la ciudad de Puno, Perú. Paralelamente se encuestó a 350 personas durante un periodo de 4 meses, de diciembre de 2022 a marzo de 2023, para la identificación de nodos con mayor ARS. Se evaluó con encuestas presenciales y virtuales mediante el software Google Forms, se aplicó el método de escala de Likert, esta escala graduó con mucha eficacia las respuestas de los encuestados. Finalmente, se interpolan las dos variables, CO₂ y ARS, para la zonificación y el diseño de la red de ciclovías resilientes y autopoiéticas, utilizando el método Net Work Analysis por la distancia más corta, resolviendo problemas de red de transitabilidad, flujo o capacidad de conexiones de redes resultantes. Este estudio de las 2 variables fue posterior a la pandemia de COVID-19 en 2022.

La ejecución de la primera variable fue mediante la recolección de antecedentes y recolección de datos nuevos. Para la primera fase se utilizó 3 tesis bibliográficas referentes a contaminación atmosférica por el parque automotor de la ciudad de Puno; CO (monóxido de carbono), VHMD (volumen horario de máxima demanda y afluencia vehicular); antecedente 2: CO₂ (dióxido de carbono); antecedente 3: RUIDO (ruido). Para



el desarrollo de estos datos existentes se usó el sistema geográfico SIG. Cada variable se trabajó de manera independiente, con vectores y raster con el método Kernel, donde finalmente se obtuvieron 4 mapas parciales que se interpolaron entre sí obteniendo un mapa final de antecedentes. Luego se definió puntos de monitoreo con el mapa final de antecedentes con una grilla de 250m y la identificación de jerarquía vial, vías principales y secundarias de punto. Con los 47 puntos identificados se salió a campo a monitorear con equipos: sensor de CO₂, anemómetro, trípode y GPS. El monitoreo se realizó en horas de la mañana, tarde y noche; cada punto se monitoreó una sola vez. En la identificación de nodos se ejecutó mediante el resultado del mapa de nivel de CO₂. Con el método de densidad de Kernel se obtuvieron 9 nodos de mayor contaminación por CO₂, estos 9 nodos se volvieron a monitorear 3 veces al día mañana tarde y noche para poder sacar con exactitud la media de cada punto.

En la ejecución de la segunda variable ARS se realizó una encuesta de 350 formatos entre presenciales y virtuales. Para la validación de las encuestas se utilizó el software: R, con el método alfa Cronbach donde el análisis de confiabilidad fue de 0.90 siendo alta el grado de confiabilidad. Una vez realizada la confiabilidad de los formatos de encuesta se procedió a lanzar las encuestas. Se tabulo las respuestas de afluencia de los 22 parques (350 formatos), analizadas en la escala de Likert, luego se procedió a insertar los 6 nodos identificados de mayor ARS con el método de densidad de Kernel, como resultado se tuvo el mapa de nodos de mayor ARS. Para el mapa final de interpolación de las dos variables se volvió a utilizar el método de Kernel con el algebra de mapas, y para el diseño de red de ciclovías se analizó con Work Analisys por la distancia más corta.

Los resultados mostraron una asociación geográfica entre valores más altos de concentración de CO₂ y ARS.



Los resultados de la primera variable se identificaron puntos con menor y mayor flujo de contaminación de CO₂, desde 425.25 M-6 ppm hasta los 884.17 ppm M-13. Finalmente se obtuvo el nivel de CO₂ en la ciudad de Puno, con un total de promedio de 615.76 ppm de CO₂ con un porcentaje de 176% excediéndose un 76% ya que 350 ppm representa el 100% de CO₂ permisible existente en la naturaleza. En cuanto a los resultados de los 9 nodos de mayor contaminación identificados tienen un rango de CO₂ de 600 a 900 ppm y con el monitoreo de estos 9 nodos se obtuvo 713.79 ppm de CO₂ en el punto M-25.

Los resultados de la segunda variable ARS se obtuvieron 150 encuestas virtuales y 200 encuestas presenciales con una media de varones de 46.90% y de mujeres 53.10%, donde los resultados muestran espacios de esparcimiento de mayor afluencia y de menor afluencia, en el cual se detalla el parque Cesar Vallejo con 40 personas de menor afluencia y el espacio de mayor afluencia que es el casco monumental de Puno con 267 personas. De dichos datos se lograron obtener 6 nodos de mayor afluencia que son: Puerto Muelle Lacustre, Puerto Banquero Rossi, Casco Monumental Plaza de Armas, Parque Dante Nava y Parque de las Aguas.

La interpolación de estas dos variables nodos mayores de CO₂ + ARS mostraron una red de ciclovías con 8849 ml. Por consiguiente, el diseño de red de ciclovías hacia espacios de esparcimiento muestra flujos resilientes y autopoieticas, con una base de datos de CO₂ para futuras investigaciones. Finalizando se hizo un comparativa con una investigación análoga de ciclovías emergentes de Francia y Colombia en esta investigación se analizó ciclovías ejecutadas durante la pandemia COVID 2020-2021, los resultados mostraron que estos carriles emergentes fueron desmantelados y algunas permanecieron. Por ende, nuestra investigación cierra brechas de cuán importante es la planificación y zonificación de red de ciclovías resilientes y la priorización de trayectos de ciclovías con mayor afluencia de espacios de esparcimientos y nodos críticos de CO₂.



CAPÍTULO II. ARTICULO ACEPTADO

Designing resilient bicycle paths in Puno, Peru: Combating urban CO₂ emissions with GIS analysis

Juan Nihol Bravo Inchuña¹, Luz Clara Calisaya Rojas², Grover Marin Mamani³

¹0009-0009-6564-6412, *Academic Department of Architecture and Urbanism. Faculty of Civil Engineering and Architecture, Universidad Nacional del Altiplano de Puno, Perú;* auacenihol@gmail.com

²0009-0009-1388-1058, *Academic Department of Architecture and Urbanism. Faculty of Civil Engineering and Architecture, Universidad Nacional del Altiplano de Puno, Perú;* claritarojas.tj@gmail.com

³ 0000-0003-4222-6297, *Academic Department of Architecture and Urbanism. Faculty of Civil Engineering and Architecture, Universidad Nacional del Altiplano de Puno, Perú;* gmarin@unap.edu.pe

Abstract

This study monitored CO₂ emissions generated by motorized vehicles in the city of Puno, Peru, to design a network of resilient bicycle paths. The network includes routes to recreational spaces and addresses critical nodes of CO₂ pollution through the application of Geographic Information Systems (GIS). The study determined the total levels of CO₂ in the city's urban fabric, identifying nodes with higher CO₂ concentrations. Additionally, it evaluated the Affluence of Recreational Spaces (ARS) and performed the interpolation of CO₂ and ARS variables on zoning maps. CO₂ measurements were analyzed using the Kernel density method in QGIS. ARS was assessed through 350 face-to-face and virtual surveys using Google Forms, structured on a Likert scale. The study period was post-COVID-19 pandemic in 2022. Finally, the researchers integrated the data into a GIS base using map algebra and network analysis.

The results demonstrated a geographical association between higher values of CO₂ concentration and ARS. Furthermore, the city exhibited a higher level of CO₂ concentration, with 615.76 ppm, exceeding existing natural limits by 76%. The study



identified nine critical CO₂ nodes, with the highest concentration registering at 713.49 ppm. Additionally, six nodes with the highest ARS were identified. The interpolated variables of the CO₂ and ARS nodes resulted in a primary bicycle path network of 8849 linear meters, connecting to the most relevant recreational spaces in the city of Puno.

Keywords: CO₂, recreational spaces, bicycle paths

1. Introduction

Carbon dioxide (CO₂) is a greenhouse gas produced by various anthropogenic activities, with motorized transport serving as the primary source of pollution in cities as a consequence of urban modernization. The scientific community has acknowledged it as the main contributor to climate change since 1863 (Tisher, 2021). In 1896, researchers established that the burning of fossil fuels causes global warming (Weart, 2013), conclusively demonstrating that CO₂ is primarily responsible for the 60% to 63% increase in pollution radiating through the layers of the atmosphere since 1979 (Hofmann et al., 2006).

The 2007 WMO bulletin reported a temperature increase in January and April of 1.37 °C and 1.89 °C, respectively, with an average of 14.42 °C between 1998 and 2007 (the average for the period 1961-1990 was 14.0 °C). The latest IPCC 2007 report indicates that the highest level of global warming occurred in 1998 with a temperature of 14.54 °C (Ballesteros et al., 2007). According to the 2007 IPCC, "Warming of the climate system is unequivocal, as evidenced by observed increases in global mean air and ocean temperatures, widespread melting of snow and ice, and rising global mean sea level" (Pachuri & Reisinger, 2007). Furthermore, WHO states that 58% of premature deaths



occurred in 2016 are related to CO₂ pollution (Priya, 2016).

The CO₂ emissions from motorized vehicles globally exhibit the highest percentage, with a more significant contribution observed in developed countries (Marion et al., 2022; Abreu et al., 2020). Latin America, particularly Peru, ranks 21st in air quality according to the 2018 World Air Quality Report, highlighting a substantial contribution to anthropogenic air pollution. Metropolitan Lima faces heightened fossil fuel consumption, resulting in severe environmental and atmospheric pollution, notably impacting residents' physical and mental well-being. A survey found that 51.3% of Lima's population perceives a decline in their quality of life due to vehicular congestion (Cordova et al., 2021).

In the Puno region, the vehicular fleet, especially in the city of Puno, is diverse. In 2000, there were 13.33 vehicles per 1,000 inhabitants, and by

2011, this figure surged to 27.17 vehicles per 1,000 inhabitants, marking a notable increase of 2.04 vehicles (GRP, 2013). This underscores the urgency for targeted interventions in the region to address escalating challenges associated with vehicular emissions and their adverse impacts on air quality and public health.

Currently, motorized vehicles are the preferred choice due to the convenience they offer to individuals. Non-motorized alternatives, such as sustainable mobility, remain unexplored due to the lack of a comprehensive cycling infrastructure plan. Around 2000, bicycles were the most popular mode of transportation in Puno, with 62% of households having one, especially in urban areas. However, in subsequent years, bicycle usage declined due to a lack of infrastructure and the increasing number of motor vehicles.

Bicycles (Luna et al., 2021), dedicated cycling lanes, scooters, among



other options, are considered less environmentally impactful forms of sustainable mobility for mitigating climate change. They are also recognized as essential elements of urban spaces, helping reduce the consumption of carbon-intensive energy sources. The term "sustainable mobility," coined mainly in the 20th century in response to social and environmental concerns arising from motorized transport ([National Censuses, 2000](#)), advocates for a strategic model prioritizing public transportation, cycling, and walking to minimize energy consumption and air pollution, with a specific focus on addressing social connectivity needs ([Pucher & Dijkstra, 2003](#)).

Research has designed tourist-centric cycling routes, providing opportunities to contribute to the reduction of environmental and acoustic pollution, as well as enhancing the local economy. Project results demonstrated feasibility

and gained significant social acceptance. The concept of linking sustainable mobility with cycling networks and public recreational spaces leverages mandatory commutes for both passive and active recreation, resulting in a resilient, self-sustaining network of cycling paths.

This research addresses the increasing CO₂ levels and the threat of climate change to Earth by monitoring CO₂. The goal is to design a network of bike lanes linked to recreational spaces, emphasizing critical CO₂ nodes. Monitoring took place at 47 points in the city of Puno to determine CO₂ levels and identify critical nodes. Additionally, a survey identified nodes with higher Relative Spatial Autocorrelation (ARS). Tabulating this data, we represented it through heat maps using variable interpolation and network analysis, revealing a resilient bike lane network with a CO₂ database.



Furthermore, we analyzed an analogous study on emerging bike lanes in France and Colombia, focusing on lanes implemented during the 2020-2021 pandemic. Subsequently, provisional networks of emerging bike lanes were dismantled, with some retained. The study in France led to the creation of the National Database of Bike Infrastructure (Base Nationale des Aménagements Cyclables (BNAC) (Demoraes et al., 1970), underscoring the importance of planning, zoning, and infrastructure in bike lanes.

2. Methodology

The analysis involved observational, retrospective, analytical, and cross-sectional methods, allowing us to measure the CO₂ variable. This process resulted in various findings that described the extent of atmospheric pollution caused by CO₂. We established the connection between this variable and recreational spaces through the use of Geographic Information System (GIS)

maps. GIS facilitated our input and management of diverse data, commonly referred to as maps. We applied the Kernel density method to generate simplified maps, identifying neighboring patterns for calculating point/data density within a specified bandwidth. The practical and effective application of map algebra analysis assisted in data interpolation through geoprocessing tools.

Additionally, we gathered data from previous years' CO₂ sampling, helping us pinpoint areas with elevated pollution for specific CO₂ monitoring. Consequently, we determined the degree of CO₂ pollution in the city of Puno and outlined critical CO₂ nodes. The monitoring period covered 9 months, from August 2022 to May 2023, excluding months without monitoring (December 2022, January, and February 2023) due to social unrest impacting the country and the city.

Simultaneously, we surveyed over a 4-month period, from December 2022 to March 2023, using the Likert scale to identify nodes with higher Air Recirculation Systems (ARS), efficiently grading respondents' responses. Finally, we executed an interpolation of the two variables, CO₂ and ARS, to achieve an optimal outcome for zoning and the network of resilient and autopoietic cycle paths. The utilization of the Net Work Analysis method for the shortest distance facilitated our problem-solving concerning network navigability, flow, or connection capacity in resulting networks.

CO₂ level measurement:

The process consisted of two phases: background data collection and new data collection, each comprising two stages: data collection and data analysis. In the initial phase of background data collection, we utilized three bibliographic theses related to air

pollution caused by the automobile fleet in the city of Puno. The background information included: investigation 1 on CO (carbon monoxide) and VHMD (hourly volume of maximum demand of vehicular influx) (Bustinza, 2021); investigation 2 on CO₂ (Yucra, 2017); investigation 3 on vehicle horn Noise (Rojas, 2019). A geographic information system (GIS) was employed for tabulating this existing data. We approached each variable independently, following the same development process: combining vectors and raster, and applying the Kernel density method (Okabe et al., 2009). This approach resulted in obtaining four partial maps. Subsequently, we performed map algebra by interpolating these partial maps of CO, CO₂, VHMD, and Noise. The expression used was $CO + VMHD + CO_2 + Noise = 1$, assigning a percentage of influence to each variable in air pollution: CO (0.35%) + VMHD (0.35%) + CO₂ (0.15%) + Noise (0.15%)



= 100%. Consequently, we obtained the total air pollution background map of Puno. Afterward, we defined monitoring points using a 250-meter grid, locating them on the main and secondary roads of Puno following the road hierarchy (Bustinza, 2021). Figure 1 illustrates the final map of the background analysis.

For the execution of the second phase, we utilized monitoring equipment. We employed the carbon dioxide sensor JD-3002, the anemometer UNI-T UT363 BT, and supporting instruments such as tripods and GPS Etrex Garmin 64s with the UTienv application (UNI-T). Each instrument was positioned at a height of 1.5 meters. Monitoring occurred only once a day during the peak hour period, including the morning peak hour (07:00-09:00), the midday peak hour (12:00-14:00), and the evening peak hour (18:00-20:00). We monitored the initial points for 2 hours with a standardized interval. CO₂ measurements were expressed in ppm. We monitored a total

of 47 points, as illustrated in Fig 1B.

Each monitoring point produced 24 sets of reading data. To calculate the final data, we applied equation 1: $X = \frac{\sum(n_1+n_2+\dots+n_{24})}{24}$. Furthermore, we applied equation 2 to determine the average CO₂ level: $Y = \frac{\sum(n_1+n_2+\dots+n_{47})}{47}$. These data underwent tabulation utilizing the Kernel density method.

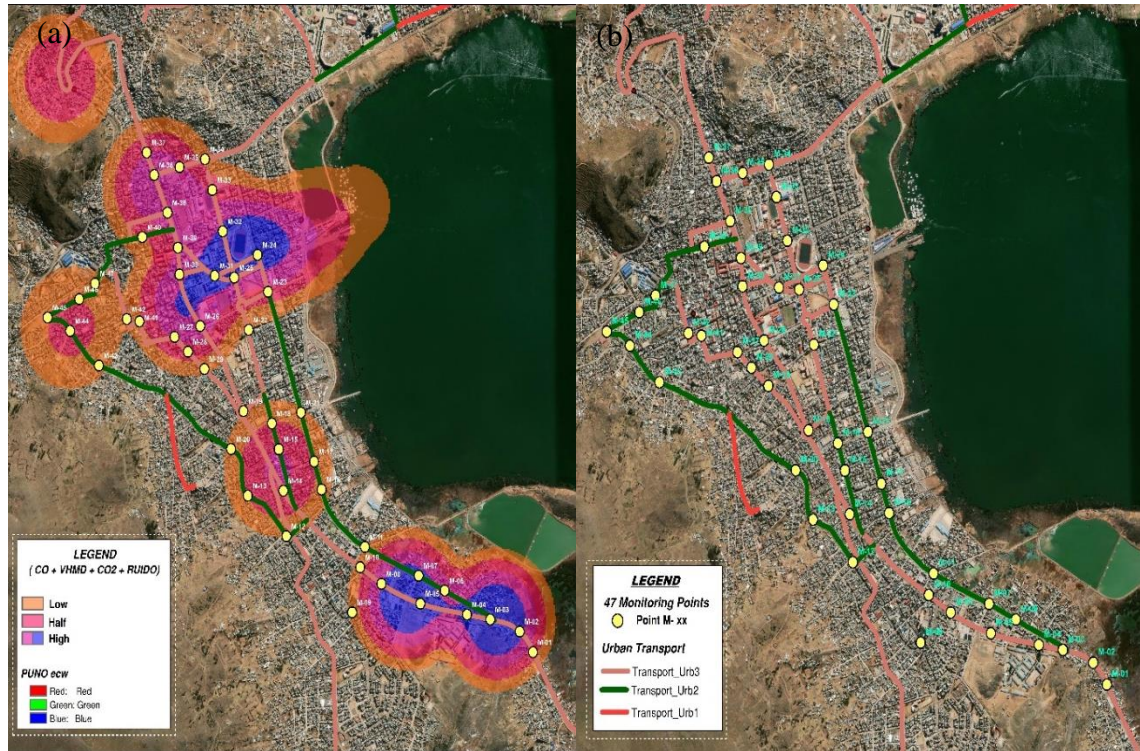


Fig. 1: Final air pollution background map, (a) results of CO + VHHD + CO2 + Noise, (b) new monitoring points.

Identification of critical nodes of higher CO₂ contamination:

Node identification utilized the CO₂ level results through the Kernel density method, applying more intense coloring in areas proximate to other vectors (Guler & Yomralioglu, 2021). A bandwidth of 500 meters was employed, and a color scale was categorized into five levels: low, medium, and high. The points identified belonged to the high-

level color range (dark blue and blue). Additionally, values exceeding 600 ppm up to 900 ppm (dark blue) and from 700 ppm to 900 ppm (blue) were taken into consideration. We considered values above 600 ppm up to 900 ppm (dark blue) and from 700 ppm to 900 ppm (blue). The nine nodes identified with the highest contamination underwent monitoring using the specialized equipment mentioned earlier. This

monitoring occurred in three stages during peak hours: morning, noon, and night. The morning (07:00-09:00), noon (12:00-14:00), and night (18:00-20:00) peak hours were encompassed within a 2-hour standardized interval. At each monitoring point, 24 reading data points were acquired, and the final data were calculated using equation 1. Additionally, equation 3 ($Z = \frac{\sum(\bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \bar{X}_3)}{3}$) was employed to determine the average across the three periods (morning, noon, and night), with the data tabulated using the Kernel density method.

Determination of the ARS and interpolation for the design of a bicycle lane network:

The execution involved two phases: Google Forms and in-person surveys, which surveyed 350 subjects. To validate and ensure survey reliability, we employed the R software with the Cronbach's Alpha method (Pinto et al.,

2014). This method evaluates internal survey consistency, with values ranging from 0 (low) to 1.0 (high).

We calculated feasibility using the equation: $\alpha = k/(k-1) * [1 - (\sum v_i)/v_t]$, where α represents Cronbach's Alpha, k is the number of items, v_i is the variance of each item, and v_t is the total variance. A pilot survey with 21 subjects, encompassing general and 22 specific questions about recreational space attendance, was conducted. These questions included inquiries like "How frequently did you visit the park...?" for each of the 22 parks in Puno, rated on a Likert scale from 1 to 5 (1 being the lowest and 5 being the highest).

In the sample, 55% were women, and 45% were men, all over 18 years old. The instrument reliability analysis yielded a result of 0.90, indicating high reliability for both the instrument and the questions. After confirming the pilot survey's reliability, we administered the

350 surveys to the general public, both virtually and in person.

We tabulated data from the 22 parks, considering high and medium values on the Likert scale (3, 4, and 5), using the Kernel density method with a 500-meter bandwidth and a color scale categorized as low, medium, and high. We identified six ARS (Recreational Space Attendance) nodes, situated in the high-color category (dark purple and purple), with parks having attendance equal to or greater than 150 people.

Finally, we generated a density map of nodes with higher ARS. To create the final interpolation map of two variables (CO₂ and ARS), we once again utilized the Kernel density method, along with map algebra, expressing $CO_2 + ARS = 1$. This determined the percentage of influence of each variable on air pollution: $CO_2 (0.50) + ARS (0.50) = 100\%$. The bandwidth used was 500 meters, and the color scale was divided into 10 ranges. For the design of the bike

path network, we performed an analysis using Network Analysis with the shortest distance method (Semenzato et al., 2023).

3. Results

CO₂ level:

The growth of the automotive fleet has led to an increase in CO₂ pollution in the city of Puno. A single vehicle can emit up to 1,000 ppm of CO₂, disrupting natural levels that hover around 350 ppm. Studies have demonstrated that concentrations of CO₂ exceeding 800 ppm in workplace environments can result in complaints due to odors. When concentrations surpass 1,000 ppm, it becomes necessary to ventilate the space until the concentration is reduced to an acceptable or very good level (Subils et al., 2000).

In the data collected on CO₂ levels in Puno, represented in heat maps with 47 datasets M-1 to M-47 in ppm units, the color range indicates the magnitude of



CO₂ pollution (dark blue and blue = high CO₂ concentration; light blue = medium CO₂ concentration; green = low CO₂ concentration). The data range from 486.29 to 755.42 ppm (dark blue, with 12 points), 439.25 to 884.17 ppm (blue, with 19 points), 425.25 to 716.67 ppm (light blue, with 16 points). The bandwidth indicates low CO₂ concentration (green, without monitoring points). Points with lower and higher CO₂ pollution flows have also been identified, ranging from 425.25 ppm at M-6 (Av. Simón Bolívar - Jr. Toribio Pacheco) to 884.17 ppm at M-13 (Av. Circunvalación Sur - Jr. Pacheco Vargas). Additionally, 24 data points

were obtained at each monitoring point, with pollution levels significantly exceeding 1000 ppm at points M-03, M-05, M-08, M-11, M-13, M-16, M-18, M-19, M-21, M-25, M-26, M-27, M-34, M-36, M-42, and M-44. The highest recorded CO₂ pollution value was 1797 ppm at M-16 (Av. Simón Bolívar - Jr. 9 de Octubre).

Finally, we obtained an average CO₂ contamination level of 615.76 ppm, which exceeds the natural limit of 350 ppm by 76%, corresponding to 100% as allowed by nature (Subils et al., 2000). These results are depicted in the map in Fig. 2.

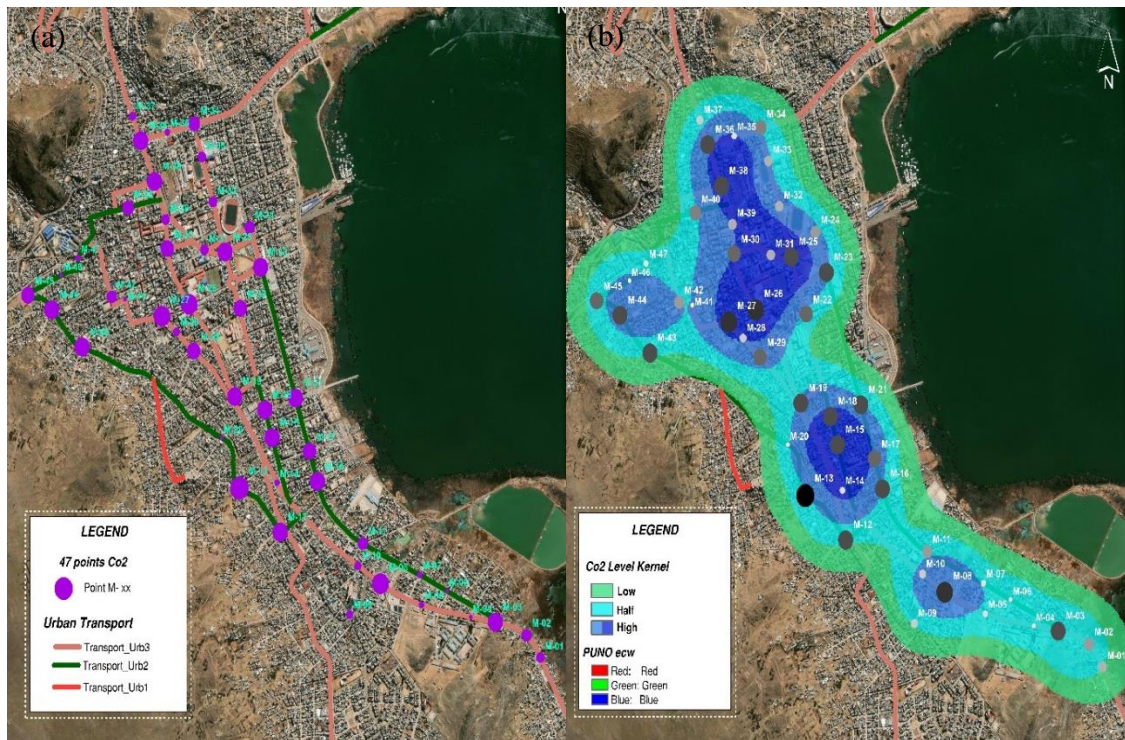


Fig. 2: (a) Map of monitored points, (b) CO₂ level densification in the city of Puno.

Critical nodes of major CO₂

pollution:

The pollution in the city of Puno surpasses the permitted natural levels by 76%, negatively impacting the surrounding ecosystem.

We attribute this heightened pollution to both the vehicular fleet and critical nodes, which contribute to increased CO₂ emissions. The comprehensive map depicts the identified points, as mentioned earlier. There are a total of 9 points with the following averages: M-

08 = 780.08 ppm, M-13 = 884.17 ppm, M-15 = 667.67 ppm, M-18 = 701.63 ppm, M-25 = 694.25 ppm, M-26 = 751.50 ppm, M-27 = 755.42 ppm, M-36 = 707.88 ppm, and M-38 = 670.38 ppm. The highest recorded CO₂ level is 884.17 ppm, and the lowest is 670.38 ppm. Fig. 3(a) illustrates the CO₂ concentration range of 600 to 900 ppm maintained by these 9 points. Naturally, CO₂ concentrations typically vary between



350 ppm and 550 ppm (Subils et al., 2000).

During the second monitoring phase, the collected data identified 9 critical nodes with higher pollution levels during three phases of the day. The results are reflected in the corresponding node maps for morning, afternoon, and night hours. Finally, we obtained the overall average for the three stages of the day for the 9 nodes (M-08 = 655.67 ppm, M-13 = 693.69 ppm, M-15 = 683.24 ppm, M-18 = 674.10 ppm, M-25 = 713.49 ppm, M-26 = 630.89 ppm, M-27 = 597.64 ppm, M-36 = 676.38 ppm, and M-38 = 601.46 ppm), represented on the average map of the 9 critical points, as shown in Fig. 3(b).

The highest recorded CO₂ concentration among these 9 points was an average of 713.49 ppm at M-25 (Av. El Sol - Av. Del Puerto - Jr. Cahuide). It's important to note that the final data for the three monitoring stages do not vary significantly, remaining within the

initial range of 600 to 900 ppm. However, there is an exception observed at point M-27 (Jr. Arequipa - Jr. Huancané), with an average of 597.64 ppm.

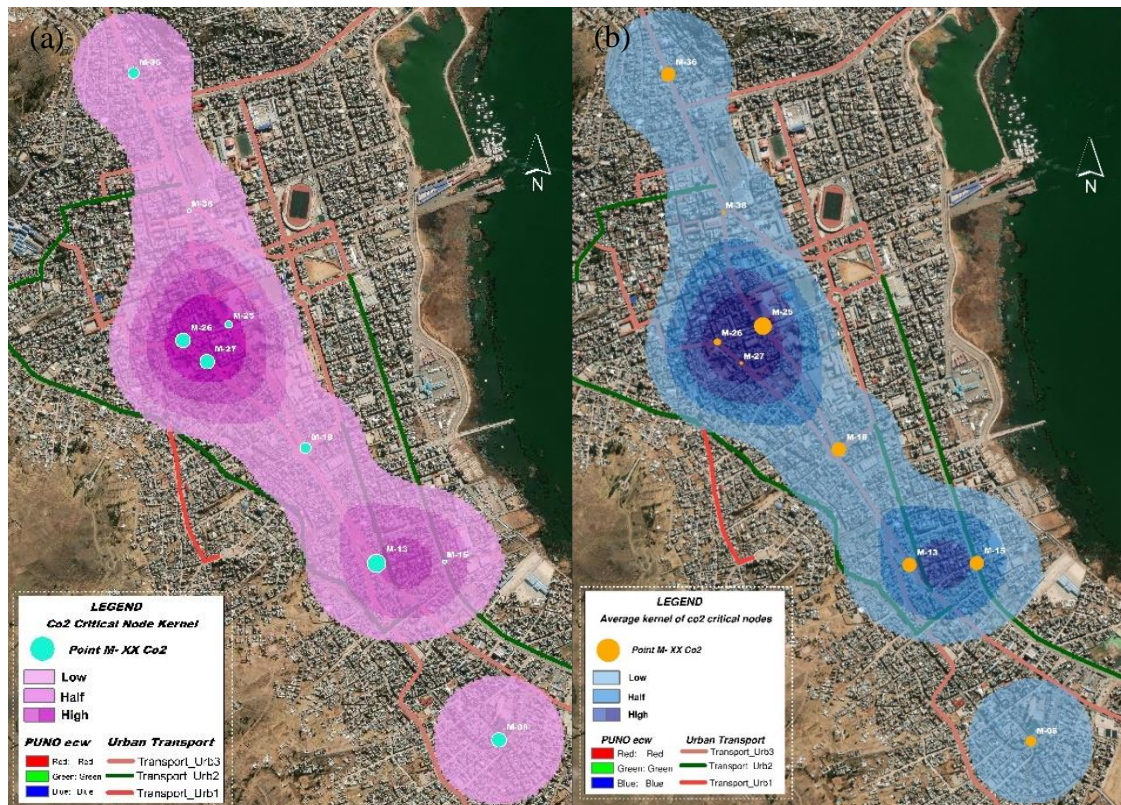


Fig. 3: (a) Map of 9 critical nodes of highest CO₂ pollution in Puno, (b) Average map (morning, evening, night) of 9 critical nodes of highest CO₂ pollution in Puno.

ARS and cycling network:

Recreational spaces, recognized for their ecological, cultural, heritage, and social values, have the capacity to offer positive experiences that contribute to the quality of life of individuals. It is also proposed that time, activity, and environmental surroundings constitute essential elements for the experience of both active and passive recreation,

influencing urban configuration and transformation, while also possessing significant potential for social flow.

The affluence in each recreational space affects the nodes of greater social concentration. The city of Puno boasts numerous recreational spaces, and to determine the Affluence of Recreational Spaces (ARS), we conducted a survey of 350 people in 22 parks (P-1 to P-22). Out

of these surveys, 150 were conducted virtually and 200 in person, with 53.10% of the respondents being women and 46.90% being men.

The results showed that there are parks with different levels of affluence. For example, César Vallejo Park was the area with the lowest affluence, registering 40 people, while the area with the highest affluence was the Casco Monumental, the Armas square and Pino square, with 267 people. Six nodes with the highest ARS were identified (P-11=Ramón Castilla oval, P-14=Dante Nava Park, P-10=the water park, P-3=Muelle Lacustre port, P-4=Banchero Rossi port and P-7=Casco Monumental the Armas square and Pino square), with affluence varying between 158 and 267 people, as shown in the heat map in [Fig. 4\(a\)](#). The interpolation of the variables for the most relevant CO₂ and ARS nodes revealed areas with a higher incidence of CO₂ and ARS influx. These areas were depicted with red-orange and

orange-green colors at 8 points (M-25 = 713.49 ppm, M-26 = 630.89 ppm, M-27 = 597.64 ppm, M-13 = 693.69 ppm, M-15 = 683.24 ppm, and P-7=Casco Monumental, Plaza de Armas, and Plaza del Pino, P-10=Parque del Agua, P-11=Óvalo Ramón Castilla) in [Fig. 4\(b\)](#). Future investigations will be aided by these zones that have been identified with higher incidences.

Finally, an analysis was also performed on a network involving both variables: 9 critical CO₂ points and 6 ARS points with an 8849m extension of the bike lane network, as shown in [Fig. 4\(b\)](#).

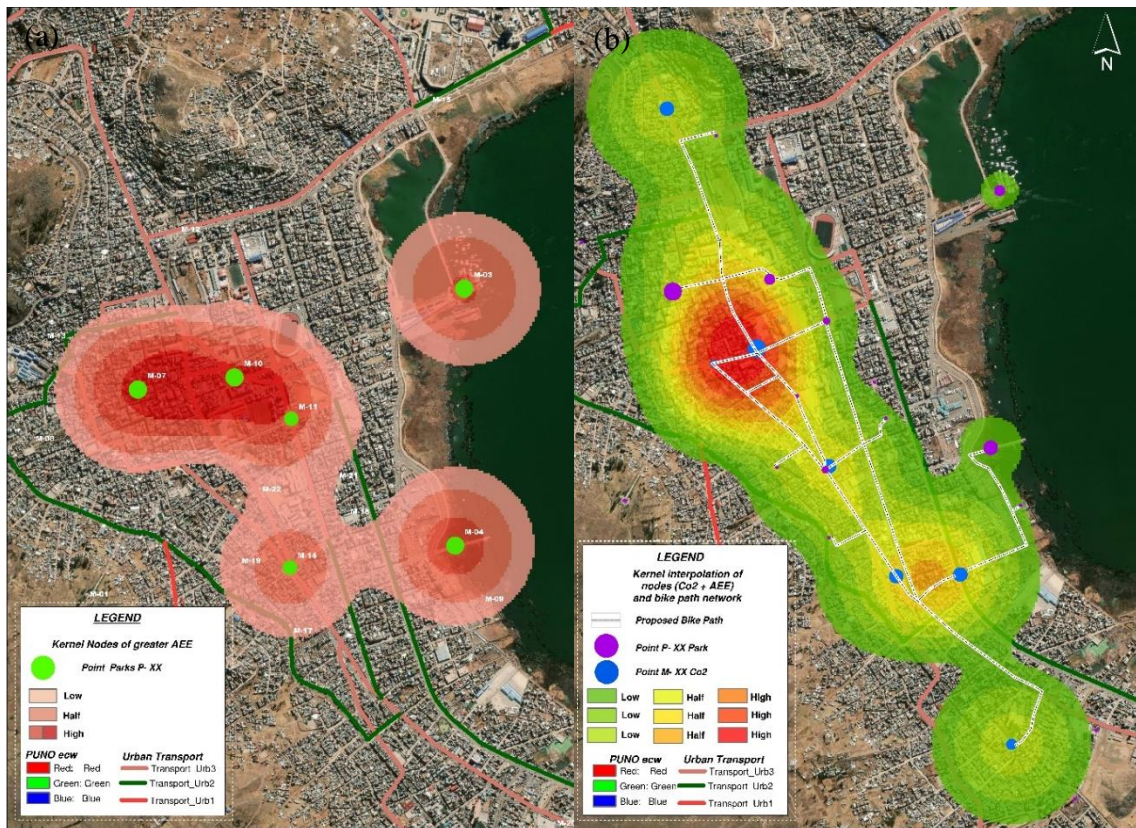


Fig. 4: (a) Map of nodes with the highest ARS, (b) Map of interpolated variables and network of roads.

4. Conclusion

The modernization of the city of Puno has prompted rapid growth in the automotive fleet, turning it into the primary source of carbon dioxide (CO₂) emissions, a gas that contributes to global warming and environmental pollution. To tackle this challenge, we conducted a thorough monitoring of CO₂ and planned a network of bike lanes

using Geographic Information Systems (GIS). The results reveal that CO₂ levels in Puno exceed the permissible limits, with a recorded concentration of 615.76 parts per million (ppm). We identified 9 critical CO₂ nodes and 6 nodes of higher density through Kernel density analysis.

We evaluated the relationship between these nodes using Network Analysis, resulting in a network of bike



lanes comprising 8,849 linear meters that connect critical CO₂ nodes with those of higher density. This node configuration generated resilient and autopoietic flows, supported by a robust CO₂ database.

Analyzing an article on emerging bike lanes in France and Colombia (Demoraes et al., 1970), it became evident that provisional bike lanes are disadvantageous for sustainable mobility, and they are commonly dismantled.

Therefore, our research addresses deficiencies in the planning and zoning of the bike lane network through a detailed study of CO₂ and density, resulting in the creation of resilient bike lane networks. This study provides us with a solid foundation to continue exploring the optimization of the bike lane network and the application of CO₂ mitigation technologies, thus contributing to the advancement of knowledge in the field of sustainable

mobility and environmental management in urban settings.

Conflict of interest

The author(s) declared no potential conflicts of interest with respect to the research, authorship, and/or publication of this article.

References

Abreu, M., Leila, Hora, M., Henrique, R., Rangel, A., José, J. Jr, E., Milton, Razmjooy, Navid, Estrela, V., Vania, Edoh, Oscar, T., Oliverira, G., Gabriel, Lano, Yuzo. (2020). A multi-criteria modeling for ranking CO₂ emitting G20 countries from the Kaya identity and their impacts on elderly health. Vol. 233, pp. 477-487.

https://doi.org/10.1007/978-3-030-75680-2_53

Ballesteros, B., Oswaldo, H., Aristizabal, L., Esperanza, G. (2007). Información técnica sobre gases de



- efecto invernadero y el cambio climático. En: Estudios Ambientales – IDEAM, pp. 1-102.
[https://docplayer.es/17361694-
Informacion-tecnica-sobre-gases-de-
efecto-invernadero-y-el-cambio-
climatico.html](https://docplayer.es/17361694-Informacion-tecnica-sobre-gases-de-efecto-invernadero-y-el-cambio-climatico.html) (Accessed: 5
December 2023).
- Bustanza, N., Yesenia. (2021).
Corredores urbanos ambientales
como ejes estructurantes en la ciudad
de Puno, Perú. En: Repositorio
Institucional Universidad Nacional
del Altiplano, pp. 250-252.
[http://repositorio.unap.edu.pe/handle/
20.500.14082/17331](http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/17331) (Accessed: 2
December 2023).
- Censos Nacionales (2000) Encuesta
demográfica y de salud familiar
departamento de puno Población IX
de población IV de Vivienda. Edición
1994, tomo I, II, III y IV. Endes 2000.
[https://proyectos.inei.gob.pe/endes/2
000/departamentales/Endes21/pdf/Pu
no.pdf](https://proyectos.inei.gob.pe/endes/2000/departamentales/Endes21/pdf/Puno.pdf) (Accessed: 15 December 2023).
- Cordova, C.H. et al. (2021). Air Quality
Assessment and pollution forecasting
using artificial neural networks in
metropolitan Lima-Peru, Nature
News.
[https://doi.org/10.1038/s41598-021-
03650-9](https://doi.org/10.1038/s41598-021-03650-9)
- Demoraes, F. et al. (1970). The spatial
dimension of ‘pop-up cycle paths’ in
metropolitan areas: a comparative
study of France and Colombia. In
Cycling Through the Pandemic:
Tactical Urbanism and the
Implementation of Pop-Up Bike
Lanes in the Time of COVID-19 (pp.
169-195). Cham: Springer
International Publishing.
[https://doi.org/10.1007/978-3-031-
45308-3_8](https://doi.org/10.1007/978-3-031-45308-3_8)



- Flores Yucra, R. (2017). Determinación del nivel de contaminación de dióxido de carbono por parque automotor en la ciudad de Puno. Universidad Nacional del Altiplano. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/9281> (Accessed: 5 December 2023). <https://doi.org/10.1080/00330124.2021.1883446>
- Gobierno Regional Puno (2013) *Plan Regional de Acción Ambiental - Pura Puno 2014 Al 2021, Planes y Estrategias*. Available at: <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/plan-regional-accion-ambiental-praa-puno-2014-2021> (Accessed: 29 April 2024). <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2006.00201.x>
- Guler, D., & Yomralioglu, T. (2021). Location evaluation of bicycle sharing system stations and cycling infrastructures with best worst method using GIS. *The Professional Geographer*, 73(3), 535-552.
- Hofmann, D. J., Butler, J. H., Dlugokencky, E. J., Elkins, J. W., Masarie, K., Montzka, S. A., & Tans, P. (2006). The role of carbon dioxide in climate forcing from 1979 to 2004: Introduction of the Annual greenhouse gas index. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2006.00201.x>
- Luna, R.M., Soto, G.B., Oviden, D.S., Padilla, A.B. (2021). Bike-Sharing Management System Using IoT. In: Iano, Y., Arthur, R., Saotome, O., Kemper, G., Padilha França, R. (eds) *Proceedings of the 5th Brazilian Technology Symposium. BTSym 2019. Smart Innovation, Systems and Technologies*, vol 201. Springer, Cham.



https://doi.org/10.1007/978-3-030-57548-9_52

Marion Leroutier et al. (2022). Air pollution and CO₂ from daily mobility: Who emits and why? Evidence from Paris. Energy Economics.

<https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.105941>

Okabe, A., Satoh, T., & Sugihara, K. (2009). A kernel density estimation method for networks, its computational method and a GIS-based tool. International Journal of Geographical Information Science, 23(1), 7-32.

<https://doi.org/10.1080/13658810802475491>

Pachauri, R. K., & Reisinger, A. (1970, January 1). Climate change 2007: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the

Fourth Assessment Report of the intergovernmental panel on climate change. University of Southern Queensland Repository.

<https://research.usq.edu.au/item/q6wy0/climate-change-2007-synthesis-report-contribution-of-working-groups-i-ii-and-iii-to-the-fourth-assessment-report-of-the-intergovernmental-panel-on-climate-change> (Accessed: 16 December 2023).

Pinto, F. S. T., Fogliatto, F. S., & Qannari, E. M. (2014). A method for panelists' consistency assessment in sensory evaluations based on the Cronbach's alpha coefficient. Food Quality and Preference, 32, 41-47.

<https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2013.06.006>

Priya Venkatesan (2016). WHO report: Air pollution is a major threat to health. The Lancet Respiratory Medicine, 351.

[https://doi.org/10.1016/S2213-2600\(16\)30014-5](https://doi.org/10.1016/S2213-2600(16)30014-5)



- Pucher, J., & Dijkstra, L. (2003). Promoting safe walking and cycling to improve public health: Lessons from the Netherlands and Germany. *American Journal of Public Health*, 93(9), 1509-1516.
<https://doi.org/10.2105/AJPH.93.9.1509>
- Rojas, C., Jorge. (2019). Mapa estratégico de ruido ambiental en la zona urbana de Puno año 2018. En Repositorio institucional Universidad Nacional del Altiplano, págs. 446-480.
<https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/12830> (Accessed: 2 December 2023).
- Semenzato, P., Costa, A., & Campagnaro, T. (2023). Accessibility to urban parks: Comparing GIS-based measures in the city of Padova (Italy). *Urban Forestry & Urban Greening*, 82, 127896.
<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.127896>
- Subils, B. José., Domínguez, B. Félix. (2000). NTP 549: El dióxido de carbono en la evaluación de la calidad del aire interior. Centro Nacional de Condiciones de Trabajo-Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales de España.
https://www.cso.go.cr/legislacion/notas_tecnicas_preventivas_insht/NTP%20549%20-%20El%20dioxido%20de%20carbono%20en%20la%20evaluacion%20de%20la%20calidad%20del%20aire%20interior.pdf (Accessed: 2 December 2023).
- Tisher, S. S. (2021). A climate chronology.
<https://umaine.edu/soe/wp-content/uploads/sites/199/2019/07/Climate-Chronology-February->



[2019.pdf](#) (Accessed: 8 December
2023).

[https://www.scientificamerican.com/
article/discovery-of-global-warming/](https://www.scientificamerican.com/article/discovery-of-global-warming/)
(Accessed: 2 December 2023).

Weart, S. (2013). The Discovery of
Global Warming. Expanded edition,
Harvard University Press.



ANEXOS

ANEXOS 1: INFORMACIÓN DE LA REVISTA

IJAAS (International Journal of ADVANCED AND APPLIED SCIENCES) es una revista internacional de ciencias avanzadas y aplicadas, revisada por pares y de acceso global abierto a su contenido publicado (acceso abierto bajo: licencia CC BY-NC-ND), con una preservación digital archivada en Pórtico, que proporciona un archivo permanente para revistas académicas electrónicas. La revista se publica periódicamente y se publica mensualmente. Es una organización y medio de difusión científica, proporciona un medio internacional para la comunicación de investigaciones, ideas y desarrollos originales en todas las áreas del campo de las Ciencias Aplicadas. IJAAS intenta aplicar el conocimiento científico existente para desarrollar aplicaciones más prácticas, como tecnología o invenciones, para resolver problemas inmediatos de la vida real de manera científica. Su principal ámbito es la aplicación del conocimiento científico transferido a un entorno físico que abarca ramas de las ciencias aplicadas como: Ingeniería, Matemática aplicada, Física aplicada, Medicina e Informática.

Información bibliográfica del IJAAS:

- Imprimir ISSN: 2313-626X
- EISSN: 2313-3724
- Editorial: Instituto de Extensión de Ciencias Avanzadas (IASE)
- País: Taiwán
- Título clave abreviado: Int. j. adv. aplicable. ciencia.
- Prefijo DOI: 10.21833
- Frecuencia actual: mensual
- Tipo de publicación: periódica
- Idioma: inglés



- Creación: 2014
- Editor en jefe: Prof. Cheng-Ta Yeh
- Scopus URL: <https://www.scopus.com/sourceid/21101045271#tabs=0>

Scopus Preview Q Author Search Sources

Source details Feedback >

International Journal of Advanced and Applied Sciences
Open Access ⓘ

Scopus coverage years: from 2019 to Present
Publisher: Institute of Advanced Science Extension (IASE)
ISSN: 2313-626X E-ISSN: 2313-3724
Subject area: Multidisciplinary
Source type: Journal

[View all documents >](#) [Set document alert](#) [Save to source list](#)

CiteScore 2022
1.0

SJR 2022
0.144

SNIP 2022
0.291

[CiteScore](#) [CiteScore rank & trend](#) [Scopus content coverage](#)

1 Improved CiteScore methodology
CiteScore 2022 counts the citations received in 2019-2022 to articles, reviews, conference papers, book chapters and data papers published in 2019-2022, and divides this by the number of publications published in 2019-2022. [Learn more >](#)

CiteScore 2022 ⓘ

$$1.0 = \frac{769 \text{ Citations 2019 - 2022}}{762 \text{ Documents 2019 - 2022}}$$

Calculated on 05 May, 2023

CiteScoreTracker 2023 ⓘ

$$0.8 = \frac{754 \text{ Citations to date}}{898 \text{ Documents to date}}$$

Last updated on 05 April, 2024 • Updated monthly



ANEXOS 2: TRADUCCIÓN AL ESPAÑOL

Diseño de ciclovías resilientes en Puno, Perú: Combatiendo las emisiones de CO₂ urbanas con análisis SIG

Juan Nihol Bravo Inchuña¹, Luz Clara Calisaya Rojas², Grover Marin Mamani³

¹0009-0009-6564-6412, *Academic Department of Architecture and Urbanism. Faculty of Civil Engineering and Architecture, Universidad Nacional del Altiplano de Puno, Perú; auacenihol@gmail.com*

²0009-0009-1388-1058, *Academic Department of Architecture and Urbanism. Faculty of Civil Engineering and Architecture, Universidad Nacional del Altiplano de Puno, Perú; claritarojas.tj@gmail.com*

³0000-0003-4222-6297, *Academic Department of Architecture and Urbanism. Faculty of Civil Engineering and Architecture, Universidad Nacional del Altiplano de Puno, Perú; gmarin@unap.edu.pe*

Abstracto

Este estudio monitoreó las emisiones de CO₂ generadas por vehículos motorizados en la ciudad de Puno, Perú, para diseñar una red de ciclovías resilientes. La red incluye rutas a espacios recreativos y aborda nodos críticos de contaminación por CO₂ mediante la aplicación de Sistemas de Información Geográfica (SIG). El estudio determinó los niveles totales de CO₂ en el tejido urbano de la ciudad, identificando nodos con mayores concentraciones de CO₂. Además, evaluó la Afluencia de Espacios Recreativos (ARS) y realizó la interpolación de variables CO₂ y ARS en mapas de zonificación. Las mediciones de CO₂ se analizaron utilizando el método de densidad Kernel en QGIS. La ARS fue evaluado a través de 350 encuestas presenciales y virtuales utilizando Google Forms, estructuradas en escala Likert. El período de estudio fue posterior a la pandemia de COVID-19 en 2022. Finalmente, se integraron los datos en una base SIG mediante álgebra de mapas y análisis de redes. Los resultados demostraron una asociación geográfica entre valores más altos de concentración de CO₂ y ARS. Además, la ciudad presentó un mayor nivel de concentración de CO₂, con 615,76 ppm, superando en un 76%



los límites naturales existentes. El estudio identificó nueve nodos críticos de CO₂, registrándose la concentración más alta de 713,49 ppm. Además, se identificaron seis nodos con la ARS más alta. Las variables interpoladas de los nodos CO₂ y ARS dieron como resultado una red primaria de ciclovías de 8849 metros lineales, conectando con los espacios recreativos más relevantes de la ciudad de Puno.

Palabras clave: CO₂, espacios recreativos, ciclovías.

1. Introducción

El dióxido de carbono (CO₂) es un gas de efecto invernadero producido por diversas actividades antropogénicas, siendo el transporte motorizado la principal fuente de contaminación en las ciudades como consecuencia de la modernización urbana. La comunidad científica lo ha reconocido como el principal contribuyente al cambio climático desde 1863 (Tisher, 2021). En 1896, los investigadores establecieron que la quema de combustibles fósiles causa el calentamiento global (Weart, 2013), demostrando de manera concluyente que el CO₂ es el principal responsable del aumento del 60% al 63%

en la contaminación que irradia a través de las capas de la atmósfera desde 1979 (Hofmann et al., 2006).

El boletín de la OMM de 2007 informó un aumento de temperatura en enero y abril de 1,37 °C y 1,89 °C, respectivamente, con un promedio de 14,42 °C entre 1998 y 2007 (el promedio para el período 1961-1990 fue de 14,0 °C). El último informe del IPCC de 2007 indica que el nivel más alto de calentamiento global se produjo en 1998 con una temperatura de 14,54 °C (Ballesteros et al., 2007). Según el IPCC de 2007, "el calentamiento del sistema climático es inequívoco, como lo demuestran los aumentos observados en



las temperaturas medias globales del aire y de los océanos, el derretimiento generalizado de la nieve y el hielo y el aumento del nivel medio global del mar" (Pachuri y Reisinger, 2007). Además, la OMS afirma que el 58% de las muertes prematuras ocurridas en 2016 están relacionadas con la contaminación por CO₂ (Priya, 2016).

Las emisiones de CO₂ de los vehículos motorizados a nivel mundial exhiben el porcentaje más alto, observándose una contribución más significativa en los países desarrollados (Marion et al., 2022; Abreu et al., 2020). América Latina, particularmente Perú, ocupa el puesto 21 en calidad del aire según el Informe Mundial sobre la Calidad del Aire de 2018, lo que destaca una contribución sustancial a la contaminación antropogénica del aire. Lima Metropolitana enfrenta un mayor consumo de combustibles fósiles, lo que resulta en una grave contaminación ambiental y atmosférica, que afecta

notablemente el bienestar físico y mental de los residentes. Una encuesta encontró que el 51,3% de la población limeña percibe una disminución en su calidad de vida debido a la congestión vehicular (Córdova et al., 2021).

En la región Puno el parque vehicular, especialmente en la ciudad de Puno, es diverso. En el año 2000 había 13,33 vehículos por cada 1.000 habitantes, y para el año 2011 esta cifra ascendió a 27,17 vehículos por cada 1.000 habitantes, marcando un notable aumento de 2,04 vehículos (GRP, 2013). Esto subraya la urgencia de intervenciones específicas en la región para abordar los crecientes desafíos asociados con las emisiones vehiculares y sus impactos adversos en la calidad del aire y la salud pública.

Actualmente, los vehículos motorizados son la opción preferida debido a la comodidad que ofrecen a los particulares. Las alternativas no motorizadas, como la movilidad



sostenible, siguen sin explorarse debido a la falta de un plan integral de infraestructura ciclista. Alrededor del año 2000, las bicicletas eran el medio de transporte más popular en Puno: el 62% de los hogares disponían de una, especialmente en las zonas urbanas. Sin embargo, en los años siguientes, el uso de bicicletas disminuyó debido a la falta de infraestructura y al creciente número de vehículos de motor.

Las bicicletas (Luna et al., 2021), los carriles exclusivos para bicicletas y los scooters, entre otras opciones, se consideran formas de movilidad sostenible con menor impacto ambiental para mitigar el cambio climático. También se los reconoce como elementos esenciales de los espacios urbanos, ya que ayudan a reducir el consumo de fuentes de energía intensivas en carbono. El término "movilidad sostenible", acuñado principalmente en el siglo XX en respuesta a las preocupaciones sociales y

ambientales derivadas del transporte motorizado (Censos Nacionales, 2000), aboga por un modelo estratégico que priorice el transporte público, la bicicleta y caminar para minimizar el consumo de energía y aire. contaminación, con un enfoque específico en abordar las necesidades de conectividad social (Pucher & Dijkstra, 2003).

La investigación ha diseñado rutas ciclistas centradas en el turismo, brindando oportunidades para contribuir a la reducción de la contaminación ambiental y acústica, además de mejorar la economía local. Los resultados del proyecto demostraron viabilidad y obtuvieron una importante aceptación social. El concepto de vincular la movilidad sostenible con redes de ciclovías y espacios recreativos públicos aprovecha los desplazamientos obligatorios para la recreación tanto pasiva como activa, lo que da como resultado una red de ciclovías resiliente y autosostenible.



Esta investigación aborda los crecientes niveles de CO₂ y la amenaza del cambio climático para la Tierra mediante el monitoreo del CO₂. El objetivo es diseñar una red de ciclovías vinculados a espacios recreativos, poniendo énfasis en los nodos críticos de CO₂. Se realizaron monitoreos en 47 puntos de la ciudad de Puno para determinar niveles de CO₂ e identificar nodos críticos. Además, una encuesta identificó nodos con mayor afluencia de espacios recreativos (ARS). Al tabular estos datos, los representamos a través de mapas de calor utilizando interpolación variable y análisis de red, revelando una red de ciclovías resiliente con una base de datos de CO₂.

Además, analizamos un estudio análogo sobre carriles para bicicletas emergentes en Francia y Colombia, centrándonos en los carriles implementados durante la pandemia 2020-2021. Posteriormente, se desmantelaron las redes provisionales de

ciclovías emergentes y se conservaron algunas. El estudio en Francia condujo a la creación de la Base Nacional de Datos de Infraestructura para Bicicletas (Base Nationale des Aménagements Cyclables (BNAC) (Demoraes et al., 1970), subrayando la importancia de la planificación, la zonificación y la infraestructura en los carriles para bicicletas.

2. Metodología

El análisis involucró métodos observacionales, retrospectivos, analíticos y transversales, lo que nos permitió medir la variable CO₂. Este proceso dio como resultado varios hallazgos que describieron el alcance de la contaminación atmosférica causada por el CO₂. Establecimos la conexión entre esta variable y los espacios recreativos mediante el uso de mapas del Sistema de Información Geográfica (SIG). Los SIG facilitaron nuestra entrada y gestión de diversos datos,



comúnmente conocidos como mapas. Aplicamos el método de densidad Kernel para generar mapas simplificados, identificando patrones vecinos para calcular la densidad de puntos/datos dentro de un ancho de banda específico. La aplicación práctica y eficaz del análisis de álgebra cartográfica ayudó en la interpolación de datos mediante herramientas de geoprocésamiento.

Además, recopilamos datos de muestreos de CO₂ de años anteriores, lo que nos ayudó a identificar áreas con contaminación elevada para un monitoreo específico de CO₂. En consecuencia, determinamos el grado de contaminación por CO₂ en la ciudad de Puno y delineamos nodos críticos de CO₂. El período de monitoreo abarcó 9 meses, de agosto de 2022 a mayo de 2023, excluyendo los meses sin monitoreo (diciembre de 2022, enero y febrero de 2023) debido al malestar social que impacta al país y a la ciudad.

Simultáneamente, encuestamos durante un período de 4 meses, desde diciembre de 2022 hasta marzo de 2023, utilizando la escala Likert para identificar nodos con mayores Sistemas de recirculación de aire (ARS), calificando de manera eficiente las respuestas de los encuestados. Finalmente, ejecutamos una interpolación de las dos variables, CO₂ y ARS, para lograr un resultado óptimo para la zonificación y la red de ciclovías resilientes y autopoiéticos. La utilización del método de Análisis de Trabajo de Red para la distancia más corta facilitó la resolución de problemas relacionados con la navegabilidad de la red, el flujo o la capacidad de conexión en las redes resultantes.

Medición del nivel de CO₂:

El proceso constaba de dos fases: recopilación de datos de antecedentes y recopilación de nuevos datos, cada una de las cuales constaba de dos etapas:

recopilación de datos y análisis de datos. En la fase inicial de recolección de antecedentes se utilizaron tres tesis bibliográficas relacionadas con la contaminación del aire provocada por el parque automotor en la ciudad de Puno. Los antecedentes incluyeron: investigación 1 sobre CO (monóxido de carbono) y VHMD (volumen horario de demanda máxima de afluencia vehicular) (Bustinza, 2021); investigación 2 sobre CO₂ (Yucra, 2017); investigación 3 sobre Ruido de bocina de vehículo (Rojas, 2019). Se empleó un sistema de información geográfica (SIG) para tabular estos datos existentes. Abordamos cada variable de forma independiente, siguiendo el mismo proceso de desarrollo: combinando vectores y ráster, y aplicando el método de densidad Kernel (Okabe et al., 2009). Este enfoque dio como resultado la obtención de cuatro mapas parciales. Posteriormente, realizamos álgebra de mapas

interpolando estos mapas parciales de CO, CO₂, VHMD y ruido. La expresión utilizada fue $CO + VMHD + CO_2 + Ruido = 1$, asignando un porcentaje de influencia a cada variable en la contaminación del aire: CO (0,35%) + VMHD (0,35%) + CO₂ (0,15%) + Ruido (0,15%) = 100%. En consecuencia, obtuvimos el mapa de antecedentes de contaminación atmosférica total de Puno. Posteriormente, definimos puntos de monitoreo mediante una grilla de 250 metros, ubicándolos en las vías principales y secundarias de Puno siguiendo la jerarquía vial (Bustinza, 2021). La Figura 1 ilustra el mapa final del análisis de antecedentes.

Para la ejecución de la segunda fase se utilizaron equipos de monitoreo. Se utilizó el sensor de dióxido de carbono JD-3002, el anemómetro UNI-T UT363 BT e instrumentos de soporte como trípodes y GPS Etrex Garmin 64s con la aplicación UTienv (UNI-T). Cada instrumento se colocó a una altura de 1,5

metros. El monitoreo se realizó solo una vez al día durante el período de la hora pico, incluida la hora pico de la mañana (07:00-09:00), la hora pico del mediodía (12:00-14:00) y la hora pico de la tarde (18:00-20:00). Monitorizamos los puntos iniciales durante 2 horas con un intervalo estandarizado. Las mediciones de CO₂ se expresaron en ppm. Monitorizamos un total de 47 puntos,

como se ilustra en la Figura 1B. Cada punto de monitoreo produjo 24 conjuntos de datos de lectura. Para calcular los datos finales, aplicamos la ecuación 1: $X = \sum(n_1+n_2+\dots+n_{24})/24$. Además, aplicamos la ecuación 2 para determinar el nivel promedio de CO₂: $Y = \sum(n_1+n_2+\dots+n_{47})/47$. Estos datos se tabularon utilizando el método de densidad Kernel.

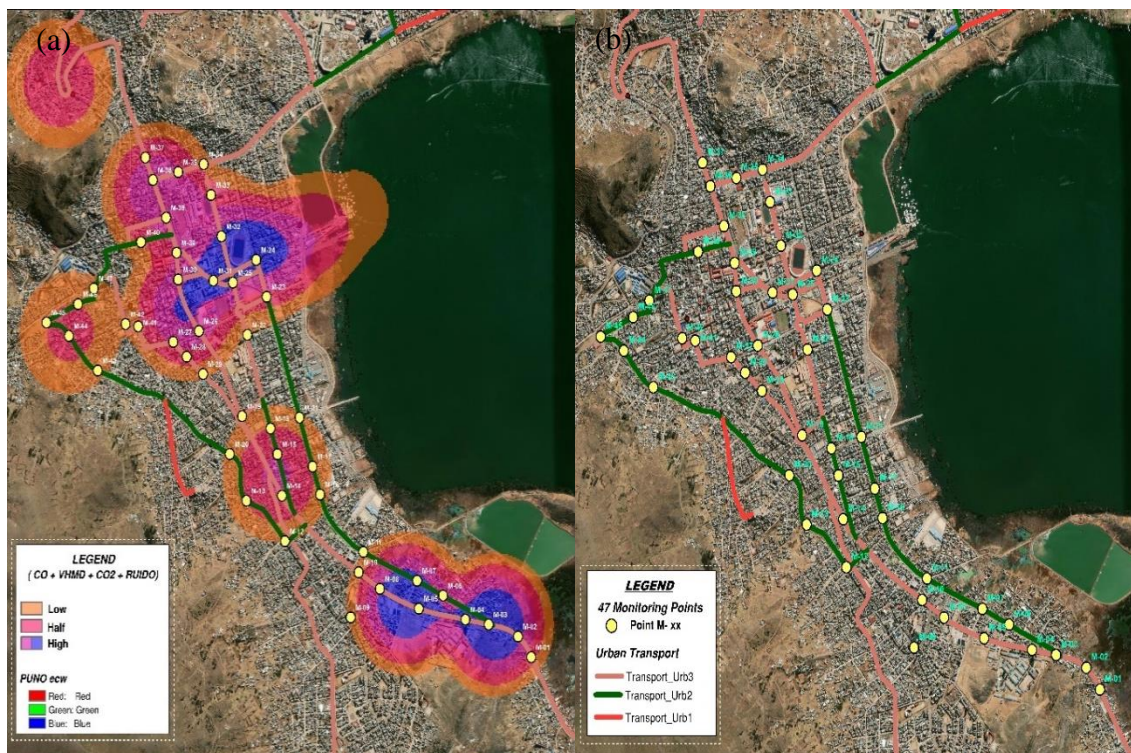


Figura 1: Mapa final de antecedentes de contaminación del aire, (a) resultados de CO + VHHD + CO₂ + Ruido, (b) nuevos puntos de monitoreo.

Identificación de nodos críticos de mayor contaminación por CO₂:

La identificación de nodos utilizó los resultados del nivel de CO₂ a través del método de densidad Kernel, aplicando una coloración más intensa en áreas cercanas a otros vectores (Guler & Yomralioglu, 2021). Se empleó un ancho de banda de 500 metros y se clasificó una escala de colores en cinco niveles: bajo, medio y alto. Los puntos identificados pertenecían a la gama cromática de alto nivel (azul oscuro y azul). Además, se tomaron en consideración valores superiores a 600 ppm hasta 900 ppm (azul oscuro) y desde 700 ppm a 900 ppm (azul). Se consideraron valores superiores a 600 ppm hasta 900 ppm (azul oscuro) y desde 700 ppm hasta 900 ppm (azul). Los nueve nodos identificados con mayor contaminación fueron monitoreados mediante el equipo especializado mencionado anteriormente. Este monitoreo se realizó en tres etapas durante las horas pico:

mañana, mediodía y noche. Las horas pico de la mañana (07:00-09:00), el mediodía (12:00-14:00) y la noche (18:00-20:00) se abarcaron dentro de un intervalo estandarizado de 2 horas. En cada punto de monitoreo, se adquirieron 24 puntos de datos de lectura y los datos finales se calcularon usando la ecuación 1. Además, se empleó la ecuación 3 ($Z = \frac{\sum(\bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \bar{X}_3)}{3}$) para determinar el promedio en los tres períodos. (mañana, mediodía y noche), con los datos tabulados mediante el método de densidad Kernel.

Determinación de la ARS e interpolación para el diseño de una red de ciclovías:

La ejecución constó de dos fases: Formularios de Google y encuestas presenciales, en las que se encuestó a 350 sujetos. Para validar y garantizar la confiabilidad de la encuesta, utilizamos el software R con el método Alfa de Cronbach (Pinto et al., 2014). Este

método evalúa la coherencia de la encuesta interna, con valores que oscilan entre 0 (bajo) y 1,0 (alto).

Calculamos la viabilidad utilizando la ecuación: $\alpha = k/(k-1) * [1 - (\sum v_i)/v_t]$, donde α representa el Alfa de Cronbach, k es el número de ítems, v_i es la varianza de cada ítem y v_t es la varianza total. Se realizó una encuesta piloto con 21 sujetos, que abarcó preguntas generales y 22 específicas sobre la afluencia a espacios recreativos. Estas preguntas incluían preguntas como "¿Con qué frecuencia visitaste el parque...?" para cada uno de los 22 parques de Puno, calificados en una escala Likert del 1 al 5 (siendo 1 el más bajo y 5 el más alto).

De la muestra, el 55% eran mujeres y el 45% hombres, todos mayores de 18 años. El análisis de confiabilidad del instrumento arrojó un resultado de 0,90, lo que indica alta confiabilidad tanto para el instrumento como para las preguntas. Después de confirmar la confiabilidad de la encuesta piloto,

administramos las 350 encuestas al público en general, tanto de manera virtual como en persona.

Se tabularon los datos de los 22 parques, considerando valores altos y medios en la escala Likert (3, 4 y 5), utilizando el método de densidad Kernel con un ancho de banda de 500 metros y una escala de colores categorizada como baja, media y alta. Identificamos seis nodos ARS (Afluencia de Espacios Recreativos), situados en la categoría de color alto (morado oscuro y morado), con parques con una afluencia igual o superior a 150 personas.

Finalmente, generamos un mapa de densidad de nodos con mayor ARS. Para crear el mapa de interpolación final de dos variables (CO_2 y ARS), utilizamos nuevamente el método de densidad Kernel, junto con álgebra de mapas, expresando $CO_2 + ARS = 1$. Esto determinó el porcentaje de influencia de cada variable en la contaminación del aire: $CO_2 (0,50) + ARS (0,50) = 100\%$.

El ancho de banda utilizado fue de 500 metros y la escala de colores se dividió en 10 rangos. Para el diseño de la red de ciclovías, realizamos un análisis mediante Análisis de Red con el método de la distancia más corta (Semenzato et al., 2023).

3. Resultados

Nivel de CO₂:

El crecimiento del parque automotor ha provocado un aumento de la contaminación por CO₂ en la ciudad de Puno. Un solo vehículo puede emitir hasta 1.000 ppm de CO₂, alterando los niveles naturales que rondan las 350 ppm. Los estudios han demostrado que concentraciones de CO₂ superiores a 800 ppm en entornos laborales pueden provocar quejas debido a los olores. Cuando las concentraciones superan las 1.000 ppm, se hace necesario ventilar el espacio hasta que la concentración se reduzca a un nivel aceptable o muy bueno (Subils et al., 2000).

En los datos recopilados sobre los niveles de CO₂ en Puno, representados en mapas de calor con 47 conjuntos de datos M-1 a M-47 en unidades ppm, la gama de colores indica la magnitud de la contaminación por CO₂ (azul oscuro y azul = alta concentración de CO₂; azul claro = concentración media de CO₂; verde = concentración baja de CO₂). Los datos van de 486,29 a 755,42 ppm (azul oscuro, con 12 puntos), 439,25 a 884,17 ppm (azul, con 19 puntos), 425,25 a 716,67 ppm (azul claro, con 16 puntos). El ancho de banda indica una baja concentración de CO₂ (verde, sin puntos de control). También se han identificado puntos con menores y mayores flujos de contaminación por CO₂, que van desde 425,25 ppm en la M-6 (Av. Simón Bolívar - Jr. Toribio Pacheco) hasta 884,17 ppm en la M-13 (Av. Circunvalación Sur - Jr. Pacheco Vargas). Además, se obtuvieron 24 puntos de datos en cada punto de monitoreo, superando

significativamente los niveles de contaminación los 1000 ppm en los puntos M-03, M-05, M-08, M-11, M-13, M-16, M-18, M. -19, M-21, M-25, M-26, M-27, M-34, M-36, M-42 y M-44. El valor de contaminación por CO₂ más alto registrado fue de 1797 ppm en la M-16 (Av. Simón Bolívar - Jr. 9 de Octubre).

Finalmente obtuvimos un nivel promedio de contaminación por CO₂ de 615,76 ppm, que supera el límite natural de 350 ppm en un 76%, correspondiente al 100% permitido por la naturaleza (Subils et al., 2000). Estos resultados se representan en el mapa de la Fig. 2.

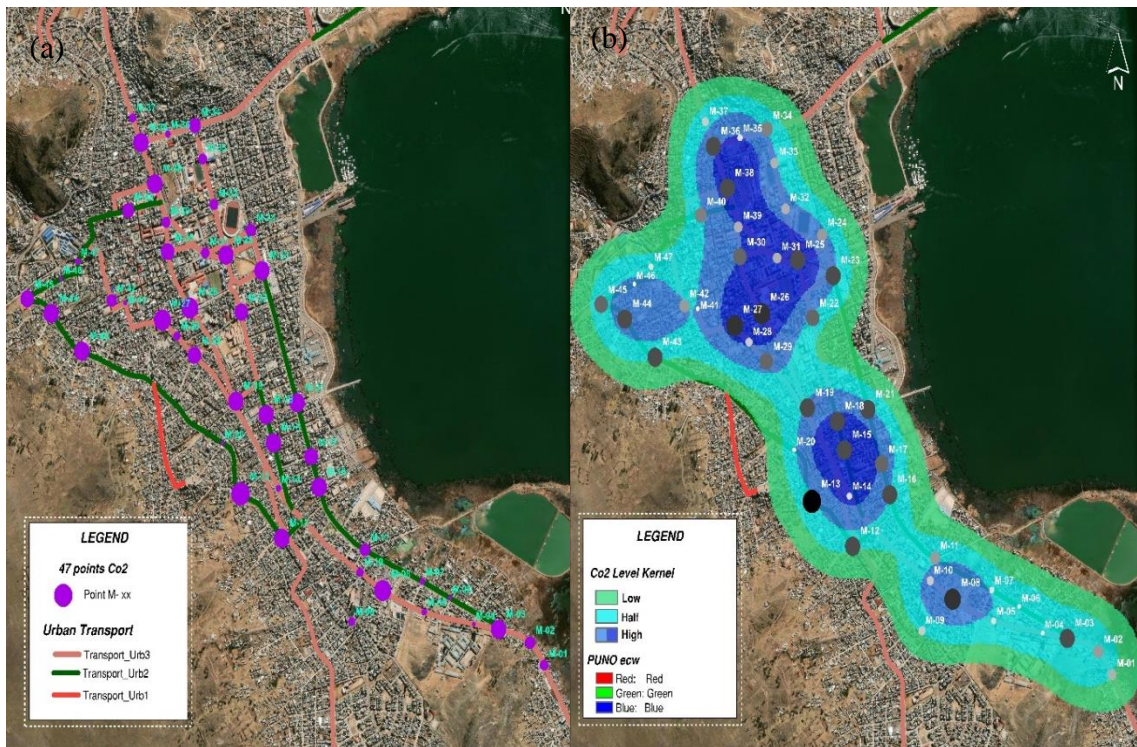


Figura 2: (a) Mapa de puntos monitoreados, (b) Densificación del nivel de CO₂ en la ciudad de Puno.

Nodos críticos de mayor contaminación por CO₂:

La contaminación en la ciudad de Puno supera en un 76% los niveles

naturales permitidos, impactando negativamente el ecosistema circundante.

Atribuimos esta mayor contaminación tanto a la flota de vehículos como a los nodos críticos, que contribuyen al aumento de las emisiones de CO₂. El mapa completo muestra los puntos identificados, como se mencionó anteriormente. Son un total de 9 puntos con los siguientes promedios: M-08 = 780.08 ppm, M-13 = 884.17 ppm, M-15 = 667.67 ppm, M-18 = 701.63 ppm, M-25 = 694.25 ppm, M-26 = 751,50 ppm, M-27 = 755,42 ppm, M-36 = 707,88 ppm y M-38 = 670,38 ppm. El nivel de CO₂ más alto registrado es de 884,17 ppm y el más bajo es de 670,38 ppm. La figura 3(a) ilustra el rango de concentración de CO₂ de 600 a 900 ppm mantenido por estos 9 puntos. Naturalmente, las concentraciones de CO₂ suelen variar entre 350 ppm y 550 ppm (Subils et al., 2000).

Durante la segunda fase de monitoreo, los datos recopilados identificaron 9 nodos críticos con niveles más altos de contaminación durante tres

fases del día. Los resultados se reflejan en los mapas de nodos correspondientes para los horarios de mañana, tarde y noche. Finalmente se obtuvo el promedio general de las tres etapas del día para los 9 nodos (M-08 = 655,67 ppm, M-13 = 693,69 ppm, M-15 = 683,24 ppm, M-18 = 674,10 ppm, M-25 = 713.49 ppm, M-26 = 630.89 ppm, M-27 = 597.64 ppm, M-36 = 676.38 ppm y M-38 = 601.46 ppm), representados en el mapa promedio de los 9 puntos críticos, como se muestra en la Fig. 3(b).

La mayor concentración de CO₂ registrada entre estos 9 puntos fue una media de 713,49 ppm en la M-25 (Av. El Sol - Av. Del Puerto - Jr. Cahuide). Es importante señalar que los datos finales para las tres etapas de monitoreo no varían significativamente, manteniéndose dentro del rango inicial de 600 a 900 ppm. Sin embargo, se observa una excepción en el punto M-27 (Jr. Arequipa - Jr. Huancané), con un promedio de 597,64 ppm.

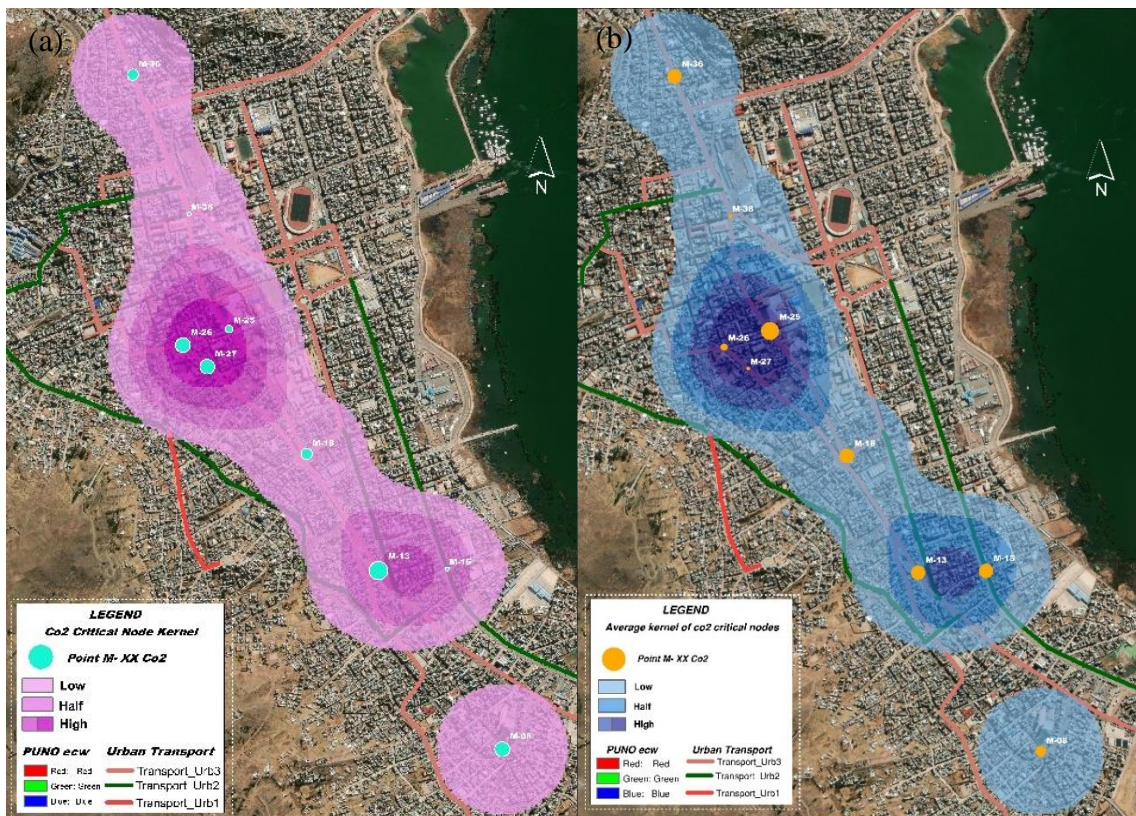


Figura 3: (a) Mapa de 9 nodos críticos de mayor contaminación por CO₂ en Puno, (b) Mapa promedio (mañana, tarde, noche) de 9 nodos críticos de mayor contaminación por CO₂ en Puno.

ARS y red de ciclovías:

Los espacios recreativos, reconocidos por sus valores ecológicos, culturales, patrimoniales y sociales, tienen la capacidad de ofrecer experiencias positivas que contribuyan a la calidad de vida de las personas. También se propone que el tiempo, la actividad y el entorno ambiental constituyen

elementos esenciales para la experiencia de recreación tanto activa como pasiva, influyendo en la configuración y transformación urbana, al tiempo que poseen un potencial significativo para el flujo social.

La afluencia en cada espacio recreativo incide en los nodos de mayor concentración social. La ciudad de Puno



cuenta con numerosos espacios recreativos, y para determinar la Afluencia de Espacios Recreativos (ARS), realizamos una encuesta a 350 personas en 22 parques (P-1 a P-22). De estas encuestas, 150 se realizaron de forma virtual y 200 de forma presencial, siendo el 53,10% de las encuestadas mujeres y el 46,90% hombres.

Los resultados mostraron que existen parques con diferentes niveles de afluencia. Por ejemplo, el Parque César Vallejo fue la zona de menor afluencia al registrar 40 personas, mientras que la zona de mayor afluencia fue el Casco Monumental, la plaza de Armas y la plaza Pino, con 267 personas. Se identificaron seis nodos con mayor ARS (P-11=óvalo Ramón Castilla, P-14=Parque Dante Nava, P-10=el parque acuático, P-3=puerto Muelle Lacustre, P-4=puerto Banquero Rossi y P-7=Casco Monumental la plaza de Armas y la plaza Pino), con una afluencia que varía entre 158 y 267 personas, como se

muestra en el mapa de calor de la Fig. 4(a). La interpolación de las variables para los nodos de CO₂ y ARS más relevantes reveló áreas con una mayor incidencia de afluencia de CO₂ y ARS. Estas áreas se representaron con colores rojo anaranjado y naranja verdoso en 8 puntos (M-25 = 713,49 ppm, M-26 = 630,89 ppm, M-27 = 597,64 ppm, M-13 = 693,69 ppm, M-15 = 683,24 ppm, y P-7=Casco Monumental, Plaza de Armas y Plaza del Pino, P-10=Parque del Agua, P-11=Óvalo Ramón Castilla) en la Fig. 4(b). Las investigaciones futuras se verán favorecidas por estas zonas que han sido identificadas con mayores incidencias.

Finalmente, también se realizó un análisis en una red que involucra ambas variables: 9 puntos críticos de CO₂ y 6 puntos ARS con una extensión de 8849 m de la red de carriles para bicicletas, como se muestra en la Fig. 4 (b).

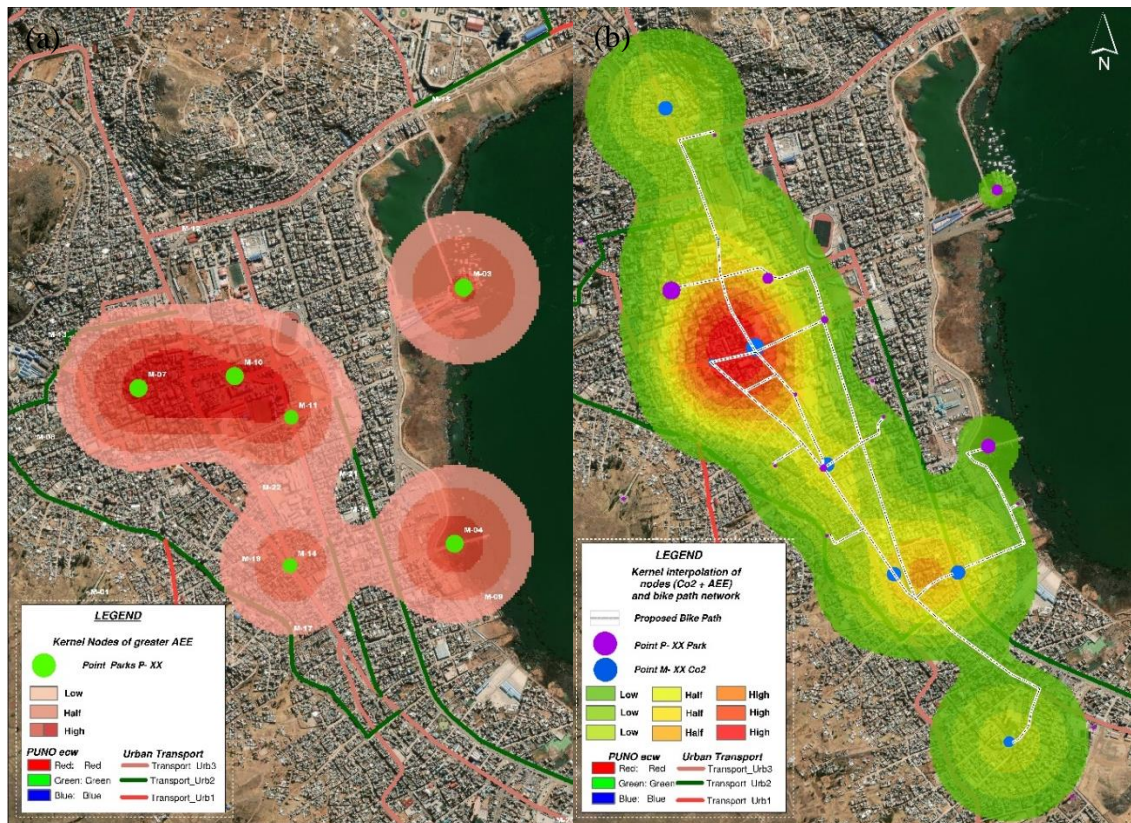


Figura 4: (a) Mapa de nodos con mayor ARS, (b) Mapa de variables interpoladas y red de carreteras.

4. Conclusión

La modernización de la ciudad de Puno ha impulsado un rápido crecimiento del parque automotor, convirtiéndola en la principal fuente de emisiones de dióxido de carbono (CO₂), gas que contribuye al calentamiento global y a la contaminación ambiental. Para afrontar este desafío, llevamos a cabo un seguimiento exhaustivo del CO₂

y planificamos una red de ciclovías utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG). Los resultados revelan que los niveles de CO₂ en Puno superan los límites permisibles, registrándose una concentración de 615,76 partes por millón (ppm). Identificamos 9 nodos de CO₂ críticos y 6 nodos de mayor ARS mediante el análisis de densidad Kernel.



Evaluamos la relación entre estos nodos mediante Análisis de Red, dando como resultado una red de ciclovías que comprende 8.849 metros lineales que conectan nodos críticos de CO₂ con aquellos de mayor ARS. Esta configuración de nodo generó flujos resilientes y autopoieticos, respaldados por una sólida base de datos de CO₂.

Al analizar un artículo sobre los carriles para bicicletas emergentes en Francia y Colombia (Demoraes et al., 1970), se hizo evidente que los carriles para bicicletas provisionales son desventajosos para la movilidad sostenible y comúnmente son desmantelados. Por ello, nuestra investigación aborda las deficiencias en la planificación y zonificación de la red de ciclovías a través de un estudio detallado de CO₂ y ARS, dando como resultado la creación de redes de ciclovías resilientes. Este estudio nos proporciona una base sólida para seguir explorando la optimización de la red de

ciclovías y la aplicación de tecnologías de mitigación de CO₂, contribuyendo así al avance del conocimiento en el campo de la movilidad sostenible y la gestión ambiental en entornos urbanos.

Conflicto de intereses

El autor(es) no declaró ningún conflicto potencial de interés con respecto a la investigación, autoría, y/o publicación de este artículo.

References

- Abreu, M., Leila, Hora, M., Henrique, R., Rangel, A., José, J. Jr, E., Milton, Razmjoooy, Navid, Estrela, V., Vania, Edoh, Oscar, T., Oliverira, G., Gabriel, Lano, Yuzo. (2020). A multi-criteria modeling for ranking CO₂ emitting G20 countries from the Kaya identity and their impacts on elderly health. Vol. 233, pp. 477-487.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-75680-2_53



- Ballesteros, B., Oswaldo, H., Aristizabal, L., Esperanza, G. (2007). Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático. En: Estudios Ambientales – IDEAM, pp. 1-102.
[https://docplayer.es/17361694-
Informacion-tecnica-sobre-gases-de-
efecto-invernadero-y-el-cambio-
climatico.html](https://docplayer.es/17361694-Informacion-tecnica-sobre-gases-de-efecto-invernadero-y-el-cambio-climatico.html) (Accessed: 5 December 2023).
- Bustanza, N., Yesenia. (2021). Corredores urbanos ambientales como ejes estructurantes en la ciudad de Puno, Perú. En: Repositorio Institucional Universidad Nacional del Altiplano, pp. 250-252.
[http://repositorio.unap.edu.pe/handle/
20.500.14082/17331](http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/17331) (Accessed: 2 December 2023).
- Censos Nacionales (2000) Encuesta demográfica y de salud familiar departamento de puno Población IX de población IV de Vivienda. Edición 1994, tomo I, II, III y IV. Endes 2000.
<https://proyectos.inei.gob.pe/endes/2000/departamentales/Endes21/pdf/Puno.pdf> (Accessed: 15 December 2023).
- Cordova, C.H. et al. (2021). Air Quality Assessment and pollution forecasting using artificial neural networks in metropolitan Lima-Peru, Nature News.
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-03650-9>
- Demoraes, F. et al. (1970). The spatial dimension of ‘pop-up cycle paths’ in metropolitan areas: a comparative study of France and Colombia. In Cycling Through the Pandemic: Tactical Urbanism and the Implementation of Pop-Up Bike Lanes in the Time of COVID-19 (pp. 169-195). Cham: Springer International Publishing.



https://doi.org/10.1007/978-3-031-45308-3_8

Flores Yucra, R. (2017). Determinación del nivel de contaminación de dióxido de carbono por parque automotor en la ciudad de Puno. Universidad Nacional del Altiplano.

<http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/9281> (Accessed: 5 December 2023).

Gobierno Regional Puno (2013) *Plan Regional de Acción Ambiental - Pura Puno 2014 Al 2021, Planes y Estrategias*. Available at:

<https://sinia.minam.gob.pe/documentos/plan-regional-accion-ambiental-praa-puno-2014-2021> (Accessed: 29 April 2024).

Guler, D., & Yomralioglu, T. (2021). Location evaluation of bicycle sharing system stations and cycling infrastructures with best worst

method using GIS. *The Professional Geographer*, 73(3), 535-552.

<https://doi.org/10.1080/00330124.2021.1883446>

Hofmann, D. J., Butler, J. H., Dlugokencky, E. J., Elkins, J. W., Masarie, K., Montzka, S. A., & Tans, P. (2006). The role of carbon dioxide in climate forcing from 1979 to 2004: Introduction of the Annual greenhouse gas index. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*.

<https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2006.00201.x>

Luna, R.M., Soto, G.B., Oviden, D.S., Padilla, A.B. (2021). Bike-Sharing Management System Using IoT. In: Iano, Y., Arthur, R., Saotome, O., Kemper, G., Padilha França, R. (eds) *Proceedings of the 5th Brazilian Technology Symposium. BTSym 2019. Smart Innovation, Systems and*



- Technologies, vol 201. Springer, Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-57548-9_52
- Marion Leroutier et al. (2022). Air pollution and CO2 from daily mobility: Who emits and why? Evidence from Paris. Energy Economics.
<https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.105941>
- Okabe, A., Satoh, T., & Sugihara, K. (2009). A kernel density estimation method for networks, its computational method and a GIS-based tool. International Journal of Geographical Information Science, 23(1), 7-32.
<https://doi.org/10.1080/13658810802475491>
- Pachauri, R. K., & Reisinger, A. (1970, January 1). Climate change 2007: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the intergovernmental panel on climate change. University of Southern Queensland Repository.
<https://research.usq.edu.au/item/q6wy0/climate-change-2007-synthesis-report-contribution-of-working-groups-i-ii-and-iii-to-the-fourth-assessment-report-of-the-intergovernmental-panel-on-climate-change> (Accessed: 16 December 2023).
- Pinto, F. S. T., Fogliatto, F. S., & Qannari, E. M. (2014). A method for panelists' consistency assessment in sensory evaluations based on the Cronbach's alpha coefficient. Food Quality and Preference, 32, 41-47.
<https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2013.06.006>



- Priya Venkatesan (2016). WHO report: Air pollution is a major threat to health. The Lancet Respiratory Medicine, 351.
[https://doi.org/10.1016/S2213-2600\(16\)30014-5](https://doi.org/10.1016/S2213-2600(16)30014-5)
- Pucher, J., & Dijkstra, L. (2003). Promoting safe walking and cycling to improve public health: Lessons from the Netherlands and Germany. American Journal of Public Health, 93(9), 1509-1516.
<https://doi.org/10.2105/AJPH.93.9.1509>
- Rojas, C., Jorge. (2019). Mapa estratégico de ruido ambiental en la zona urbana de Puno año 2018. En Repositorio institucional Universidad Nacional del Altiplano, págs. 446-480.
<https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/12830> (Accessed: 2 December 2023).
- Semenzato, P., Costa, A., & Campagnaro, T. (2023). Accessibility to urban parks: Comparing GIS-based measures in the city of Padova (Italy). Urban Forestry & Urban Greening, 82, 127896.
<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.127896>
- Subils, B. José., Domínguez, B. Félix. (2000). NTP 549: El dióxido de carbono en la evaluación de la calidad del aire interior. Centro Nacional de Condiciones de Trabajo-Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales de España.
https://www.cso.go.cr/legislacion/notas_tecnicas_preventivas_insht/NTP%20549%20-%20El%20dioxido%20de%20carbono%20en%20la%20evaluacion%20de%20la%20calidad%20del%20aire%20interior.pdf (Accessed: 2 December 2023).
- Tisher, S. S. (2021). A climate chronology.



<https://umaine.edu/soe/wp-content/uploads/sites/199/2019/07/Climate-Chronology-February-2019.pdf> (Accessed: 8 December 2023).

Weart, S. (2013). The Discovery of Global Warming. Expanded edition, Harvard University Press.

<https://www.scientificamerican.com/article/discovery-of-global-warming/>
(Accessed: 2 December 2023).

ANEXOS 3: ARTICULO PUBLICADO

International Journal of Advanced and Applied Sciences, 11(5) 2024, Pages: 96-102



Contents lists available at Science-Gate

International Journal of Advanced and Applied Sciences

Journal homepage: <http://www.science-gate.com/IJAAS.html>



Designing resilient bicycle paths in Puno, Peru: Combating urban CO₂ emissions with GIS analysis



Juan Nihol Bravo Inchuña, Luz Clara Calisaya Rojas*, Grover Marin Mamani

Academic Department of Architecture and Urbanism, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Universidad Nacional del Altiplano de Puno, Puno, Peru

ARTICLE INFO

Article history:

Received 14 October 2023

Received in revised form

27 March 2024

Accepted 29 April 2024

Keywords:

CO₂ emissions

Bicycle paths

Geographic information systems

Urban pollution

ABSTRACT

This study watched over the amount of CO₂ gas that cars and other vehicles put into the air in Puno, Peru. The goal was to create a plan for bike paths that can last through tough conditions. These paths would lead to places where people can relax and have fun and also focus on the parts of the city with the most CO₂ pollution. This was done using a tool called Geographic Information Systems (GIS). The researchers figured out how much CO₂ was in the different areas of the city, pointing out places with a lot of CO₂. They also looked at how easy it is to get to places where people go for fun (called Affluence of Recreational Spaces or ARS) and used maps to show how CO₂ levels and ARS relate to each other. They measured CO₂ using a method called Kernel density in a program called QGIS. To find out about ARS, they asked 350 people questions in person and online using Google Forms, with answers based on a rating scale. This study was done after the COVID-19 pandemic in 2022. The researchers put all their information into a GIS system using map math and checking how everything connects. Their findings showed that places with more CO₂ and ARS were linked. The city had a lot of CO₂ - 615.76 parts per million (ppm), which is 76% more than what is considered natural. They found nine main spots in the city with the most CO₂, the highest being 713.49 ppm. They also identified six spots that were most popular for fun activities. By looking at both CO₂ and ARS spots, they made a plan for bike paths totaling 8,849 meters. These paths would link to the main fun places in Puno.

© 2024 The Authors. Published by IASE. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introduction

Carbon dioxide (CO₂) is a greenhouse gas produced by various anthropogenic activities, with motorized transport serving as the primary source of pollution in cities as a consequence of urban modernization. The scientific community has acknowledged it as the main contributor to climate change since 1863. In 1896, researchers established that the burning of fossil fuels causes global warming (Weart, 2013), conclusively demonstrating that CO₂ is primarily responsible for the 60% to 63% increase in pollution radiating through the layers of the atmosphere since 1979 (Hofmann et al., 2006).

The 2007 WMO bulletin reported a temperature increase in January and April of 1.37°C and 1.89°C,

respectively, with an average of 14.42°C between 1998 and 2007 (the average for the period 1961-1990 was 14.0°C). The latest IPCC 2007 report indicates that the highest level of global warming occurred in 1998, with a temperature of 14.54°C (Ballesteros and Aristizabal, 2007). According to the 2007 IPCC, "Warming of the climate system is unequivocal, as evidenced by observed increases in global mean air and ocean temperatures, widespread melting of snow and ice, and rising global mean sea level" (Pachauri and Reisinger, 2007). Furthermore, WHO states that 58% of premature deaths occurred in 2016 are related to CO₂ pollution (Venkatesan, 2016). The CO₂ emissions from motorized vehicles globally exhibit the highest percentage, with a more significant contribution observed in developed countries (Leroutier and Quirion, 2022; Abreu et al., 2020). Latin America, particularly Peru, ranks 21st in air quality according to the 2018 World Air Quality Report, highlighting a substantial contribution to anthropogenic air pollution. Metropolitan Lima faces heightened fossil fuel consumption, resulting in severe environmental and atmospheric pollution,

* Corresponding Author.

Email Address: gmarin@unap.edu.pe (L. C. Calisaya Rojas)

<https://doi.org/10.21833/ijaas.2024.05.010>

Corresponding author's ORCID profile:

<https://orcid.org/0009-0009-1388-1058>

2313-626X/© 2024 The Authors. Published by IASE.

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

notably impacting residents' physical and mental well-being. A survey found that 51.3% of Lima's population perceives a decline in their quality of life due to vehicular congestion (Cordova et al., 2021).

In the Puno region, the vehicular fleet, especially in the city of Puno, is diverse. In 2000, there were 13.33 vehicles per 1,000 inhabitants, and by 2001, this figure surged to 27.17 vehicles per 1,000 inhabitants, marking a notable increase of 2.04 vehicles. This underscores the urgency for targeted interventions in the region to address escalating challenges associated with vehicular emissions and their adverse impacts on air quality and public health.

Currently, motorized vehicles are the preferred choice due to the convenience they offer to individuals. Non-motorized alternatives, such as sustainable mobility, remain unexplored due to the lack of a comprehensive cycling infrastructure plan. Around 2000, bicycles were the most popular mode of transportation in Puno, with 62% of households having one, especially in urban areas. However, in subsequent years, bicycle usage declined due to a lack of infrastructure and the increasing number of motor vehicles.

Bicycles (Luna et al., 2021), dedicated cycling lanes, and scooters, among other options, are considered less environmentally impactful forms of sustainable mobility for mitigating climate change. They are also recognized as essential elements of urban spaces, helping reduce the consumption of carbon-intensive energy sources. The term "sustainable mobility," coined mainly in the 20th century in response to social and environmental concerns arising from motorized transport, advocates for a strategic model prioritizing public transportation, cycling, and walking to minimize energy consumption and air pollution, with a specific focus on addressing social connectivity needs (Pucher and Dijkstra, 2003).

Research has designed tourist-centric cycling routes, providing opportunities to contribute to the reduction of environmental and acoustic pollution, as well as enhancing the local economy. Project results demonstrated feasibility and gained significant social acceptance. The concept of linking sustainable mobility with cycling networks and public recreational spaces leverages mandatory commutes for both passive and active recreation, resulting in a resilient, self-sustaining network of cycling paths.

This research addresses the increasing CO₂ levels and the threat of climate change to Earth by monitoring CO₂. The goal is to design a network of bike lanes linked to recreational spaces, emphasizing critical CO₂ nodes. Monitoring took place at 47 points in the city of Puno to determine CO₂ levels and identify critical nodes. Additionally, a survey identified nodes with higher Relative Spatial Autocorrelation (ARS). Tabulating this data, we represented it through heat maps using variable interpolation and network analysis, revealing a resilient bike lane network with a CO₂ database.

Furthermore, we analyzed an analogous study on emerging bike lanes in France and Colombia, focusing on lanes implemented during the 2020-2021 pandemic. Subsequently, provisional networks of emerging bike lanes were dismantled, with some retained. The study in France led to the creation of the National Database of Bike Infrastructure (Base Nationale des Aménagements Cyclables (BNAC) (Demoraes et al., 2024), underscoring the importance of planning, zoning, and infrastructure in bike lanes.

2. Methodology

The analysis involved observational, retrospective, analytical, and cross-sectional methods, allowing us to measure the CO₂ variable. This process resulted in various findings that described the extent of atmospheric pollution caused by CO₂. We established the connection between this variable and recreational spaces through the use of Geographic Information System (GIS) maps. GIS facilitated our input and management of diverse data, commonly referred to as maps. We applied the Kernel density method to generate simplified maps, identifying neighboring patterns for calculating point/data density within a specified bandwidth. The practical and effective application of map algebra analysis assisted in data interpolation through geoprocessing tools.

Additionally, we gathered data from previous years' CO₂ sampling, helping us pinpoint areas with elevated pollution for specific CO₂ monitoring. Consequently, we determined the degree of CO₂ pollution in the city of Puno and outlined critical CO₂ nodes. The monitoring period covered nine months, from August 2022 to May 2023, excluding months without monitoring (December 2022, January, and February 2023) due to social unrest impacting the country and the city.

Simultaneously, we surveyed over a 4-month period, from December 2022 to March 2023, using the Likert scale to identify nodes with higher Air Recirculation Systems (ARS), efficiently grading respondents' responses. Finally, we executed an interpolation of the two variables, CO₂ and ARS, to achieve an optimal outcome for zoning and the network of resilient and autopoietic cycle paths. The utilization of the Net Work Analysis method for the shortest distance facilitated our problem-solving concerning network navigability, flow, or connection capacity in resulting networks.

2.1. CO₂ level measurement

The process consisted of two phases: background data collection and new data collection, each comprising two stages: Data collection and data analysis. In the initial phase of background data collection, we utilized three bibliographic theses related to air pollution caused by the automobile fleet in the city of Puno. The background information included Investigation 1 on CO (carbon monoxide)

and VHMD (hourly volume of maximum demand of vehicular influx), Investigation 2 on CO₂ (Yucra, 2017), and Investigation 3 on Noise. A geographic information system (GIS) was employed to tabulate this existing data. We approached each variable independently, following the same development process: Combining vectors and raster and applying the Kernel density method (Okabe et al., 2009). This approach resulted in obtaining four partial maps. Subsequently, we performed map algebra by interpolating these partial maps of CO, CO₂, VHMD, and Noise. The expression used was $CO+VMHD+CO_2+Noise=1$, assigning a percentage of influence to each variable in air pollution: CO (0.35%)+VMHD (0.35%)+CO₂ (0.15%)+Noise (0.15%)=100%. Consequently, we obtained the total air pollution background map of Puno. Afterward, we defined monitoring points using a 250-meter grid, locating them on the main and secondary roads of Puno following the road hierarchy. Fig. 1 illustrates the final map of the background analysis.

For the execution of the second phase, we utilized monitoring equipment. We employed the carbon dioxide sensor JD-3002, the anemometer UNI-T UT363 BT, and supporting instruments such as tripods and GPS Etrex Garmin 64s with the UTienv application (UNI-T). Each instrument was positioned at a height of 1.5 meters. Monitoring occurred only once a day during the peak hour period, including the morning peak hour (07:00-09:00), the midday peak hour (12:00-14:00), and the evening peak hour (18:00-20:00). We monitored the initial points for 2 hours with a standardized interval. CO₂ measurements were expressed in ppm. We monitored a total of 47 points, as illustrated in Fig. 1b. Each monitoring point produced 24 sets of reading data. To calculate the final data, we applied Eq. 1: $X=\sum(n_1+n_2+\dots+n_{24})/24$. Furthermore, we applied Eq. 2 to determine the average CO₂ level: $Y=\sum(n_1+n_2+\dots+n_{47})/47$. These data underwent tabulation utilizing the Kernel density method.

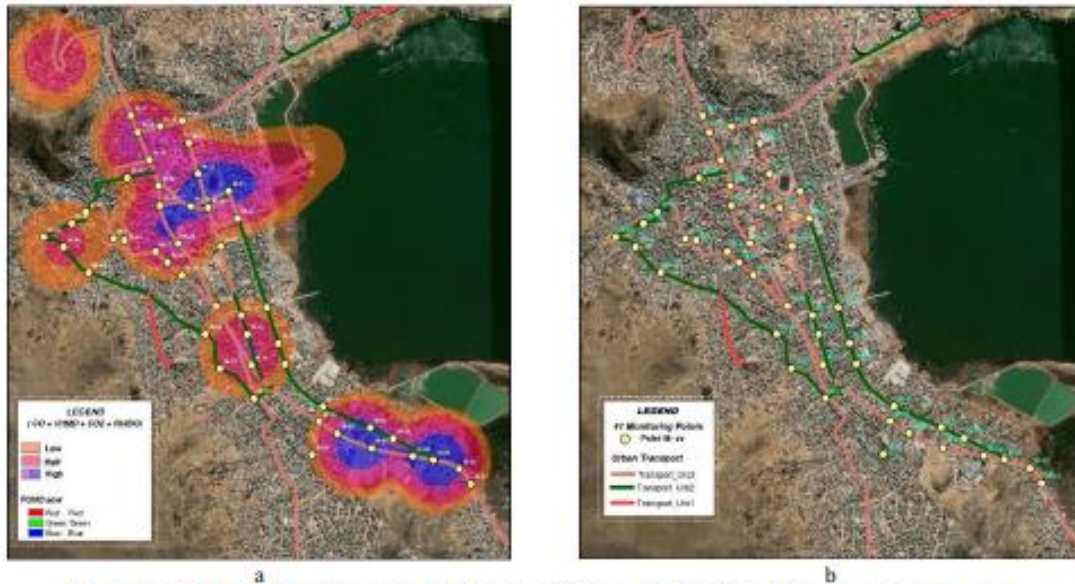


Fig. 1: Final air pollution background map, (a) results of CO+VHMD+CO₂+Noise, (b) new monitoring points

2.2. Identification of critical nodes of higher CO₂ contamination

Node identification utilized the CO₂ level results through the Kernel density method, applying more intense coloring in areas proximate to other vectors (Guler and Yomralioglu, 2021). A bandwidth of 500 meters was employed, and a color scale was categorized into five levels: low, medium, and high. The points identified belonged to the high-level color range (dark blue and blue). Additionally, values exceeding 600 ppm up to 900 ppm (dark blue) and from 700 ppm to 900 ppm (blue) were taken into consideration. We considered values above 600 ppm up to 900 ppm (dark blue) and from 700 ppm to 900 ppm (blue). The nine nodes identified with the highest contamination underwent monitoring using the specialized equipment mentioned earlier. This

monitoring occurred in three stages during peak hours: morning, noon, and night. The morning (07:00-09:00), noon (12:00-14:00), and night (18:00-20:00) peak hours were encompassed within a 2-hour standardized interval. At each monitoring point, 24 reading data points were acquired, and the final data were calculated using Eq. 1. Additionally, Eq. 3 ($Z=\sum(\bar{X}_1+\bar{X}_2+\bar{X}_3)/3$) was employed to determine the average across the three periods (morning, noon, and night), with the data tabulated using the Kernel density method.

2.3. Determination of the ARS and interpolation for the design of a bicycle lane network

The execution involved two phases: Google Forms and in-person surveys, which surveyed 350 subjects. To validate and ensure survey reliability, we

employed the R software with Cronbach's Alpha method (Pinto et al., 2014). This method evaluates internal survey consistency, with values ranging from 0 (low) to 1.0 (high).

We calculated feasibility using the equation: $\alpha = k / (k-1) * [1 - (\sum v_i) / vt]$, where α represents Cronbach's Alpha, k is the number of items, v_i is the variance of each item, and vt is the total variance. A pilot survey with 21 subjects, encompassing general and 22 specific questions about recreational space attendance, was conducted. These questions included inquiries like "How frequently did you visit the park...?" for each of the 22 parks in Puno, rated on a Likert scale from 1 to 5 (1 being the lowest and 5 being the highest).

In the sample, 55% were women, and 45% were men, all over 18 years old. The instrument reliability analysis yielded a result of 0.90, indicating high reliability for both the instrument and the questions. After confirming the pilot survey's reliability, we administered the 350 surveys to the general public, both virtually and in person.

We tabulated data from the 22 parks, considering high and medium values on the Likert scale (3, 4, and 5), using the Kernel density method with a 500-meter bandwidth and a color scale categorized as low, medium, and high. We identified six ARS (Recreational Space Attendance) nodes situated in the high-color category (dark purple and purple), with parks having attendance equal to or greater than 150 people.

Finally, we generated a density map of nodes with higher ARS. To create the final interpolation map of two variables (CO_2 and ARS), we once again utilized the Kernel density method, along with map algebra, expressing $CO_2 + ARS = 1$. This determined the percentage of influence of each variable on air pollution: $CO_2(0.50) + ARS(0.50) = 100\%$. The bandwidth used was 500 meters, and the color scale was divided into 10 ranges. For the design of the bike path network, we performed an analysis using Network Analysis with the shortest distance method (Semenzato et al., 2023).

3. Results

3.1. CO_2 level

The rise in the number of cars in Puno has caused more CO_2 pollution. Each car can release up to 1,000 parts per million (ppm) of CO_2 , which is much higher than the natural level of around 350 ppm. Research shows that when CO_2 levels go beyond 800 ppm in workplaces, people may start to notice unpleasant odors. If the concentration exceeds 1,000 ppm, it's essential to ventilate the area until the CO_2 levels drop to a safe or healthy level (Subils and Domínguez, 2000). In the collected data on CO_2 levels in Puno, represented on heat maps with 47 datasets (M-1 to M-47) in ppm units, the color range shows the CO_2 pollution levels (dark blue and blue = high CO_2 concentration; light blue = medium CO_2 concentration; green = low CO_2 concentration). The

data range from 486.29 to 755.42 ppm (dark blue, with 12 points), 439.25 to 884.17 ppm (blue, with 19 points), and 425.25 to 716.67 ppm (light blue, with 16 points). The green areas, indicating low CO_2 concentration, do not have monitoring points. The lowest and highest CO_2 levels recorded were 425.25 ppm at M-6 (Av. Simón Bolívar - Jr. Toribio Pacheco) and 884.17 ppm at M-13 (Av. Circunvalación Sur - Jr. Pacheco Vargas). Additionally, 24 data points were collected at each monitoring location, with some points significantly exceeding 1,000 ppm at M-03, M-05, M-08, M-11, M-13, M-16, M-18, M-19, M-21, M-25, M-26, M-27, M-34, M-36, M-42, and M-44. The highest recorded CO_2 pollution level was 1,797 ppm at M-16 (Av. Simón Bolívar - Jr. 9 de Octubre).

Finally, we obtained an average CO_2 contamination level of 615.76 ppm, which exceeds the natural limit of 350 ppm by 76%, corresponding to 100% as allowed by nature (Subils and Domínguez, 2000). These results are depicted in the map in Fig. 2.

3.2. Critical nodes of major CO_2 pollution

The pollution in the city of Puno surpasses the permitted natural levels by 76%, negatively impacting the surrounding ecosystem. We attribute this heightened pollution to both the vehicular fleet and critical nodes, which contribute to increased CO_2 emissions. The comprehensive map depicts the identified points, as mentioned earlier. There are a total of 9 points with the following averages: M-08=780.08 ppm, M-13=884.17 ppm, M-15=667.67 ppm, M-18=701.63 ppm, M-25=694.25 ppm, M-26=751.50 ppm, M-27=755.42 ppm, M-36=707.88 ppm, and M-38=670.38 ppm. The highest recorded CO_2 level is 884.17 ppm, and the lowest is 670.38 ppm. Fig. 3a illustrates the CO_2 concentration range of 600 to 900 ppm maintained by these 9 points. Naturally, CO_2 concentrations typically vary between 350 ppm and 550 ppm (Subils and Domínguez, 2000).

During the second monitoring phase, the collected data identified 9 critical nodes with higher pollution levels during three phases of the day. The results are reflected in the corresponding node maps for morning, afternoon, and night hours. Finally, we obtained the overall average for the three stages of the day for the 9 nodes (M-08=655.67 ppm, M-13=693.69 ppm, M-15=683.24 ppm, M-18=674.10 ppm, M-25=713.49 ppm, M-26=630.89 ppm, M-27=597.64 ppm, M-36=676.38 ppm, and M-38=601.46 ppm), represented on the average map of the 9 critical points, as shown in Fig. 3b.

The highest recorded CO_2 concentration among these 9 points was an average of 713.49 ppm at M-25 (Av. El Sol - Av. Del Puerto - Jr. Cahuide). It's important to note that the final data for the three monitoring stages do not vary significantly, remaining within the initial range of 600 to 900 ppm. However, there is an exception observed at point M-27 (Jr. Arequipa - Jr. Huancané), with an average of 597.64 ppm.

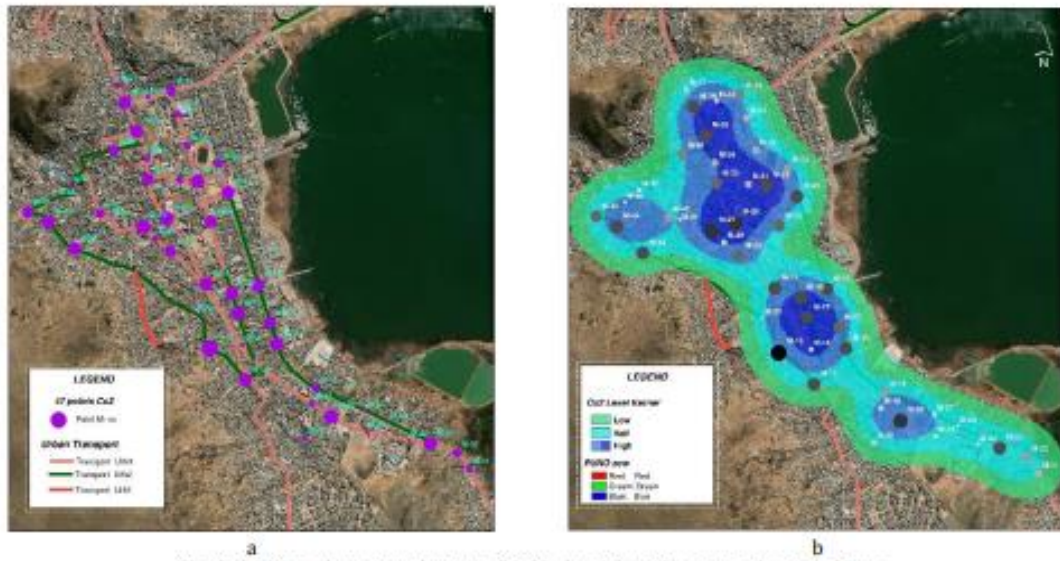


Fig. 2: (a) Map of monitored points, (b) CO₂ level densification in the city of Puno

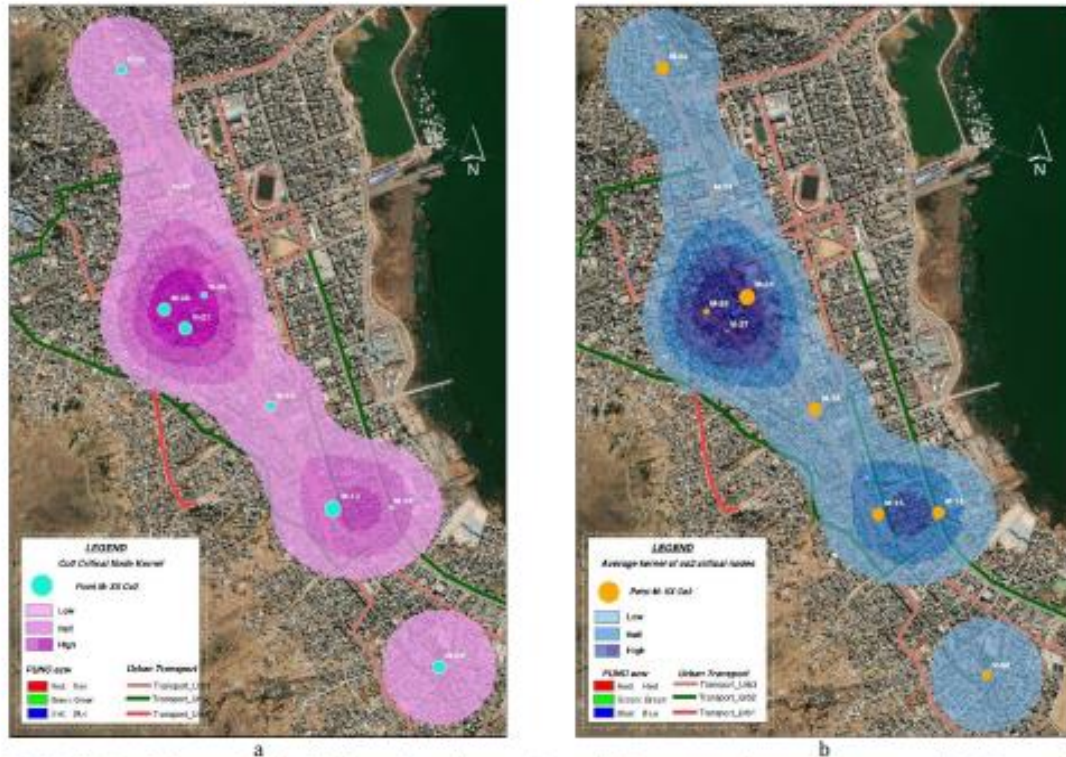


Fig. 3: (a) Map of 9 critical nodes of highest CO₂ pollution in Puno, (b) Average map (morning, evening, night) of 9 critical nodes of highest CO₂ pollution in Puno

3.3. ARS and cycling network

Recreational spaces, recognized for their ecological, cultural, heritage, and social values, have the capacity to offer positive experiences that contribute to the quality of life of individuals. It is also proposed that time, activity, and environmental surroundings constitute essential elements for the experience of both active and passive recreation, influencing urban configuration and transformation

while also possessing significant potential for social flow.

The affluence in each recreational space affects the nodes of greater social concentration. The city of Puno boasts numerous recreational spaces, and to determine the Affluence of Recreational Spaces (ARS), we conducted a survey of 350 people in 22 parks (P-1 to P-22). Out of these surveys, 150 were conducted virtually and 200 in person, with 53.10%

of the respondents being women and 46.90% being men.

The results showed that there are parks with different levels of affluence. For example, César Vallejo Park was the area with the lowest affluence, registering 40 people, while the area with the highest affluence was the Casco Monumental, Armas Square, and Pino Square, with 267 people. Six nodes with the highest ARS were identified (P-11=Ramón Castilla oval, P-14=Dante Nava Park, P-10=the water park, P-3=Muelle Lacustre port, P-4=Bancharo Rossi port and P-7=Casco Monumental the Armas square and Pino square), with affluence varying between 158 and 267 people, as shown in the heat map in Fig. 4a. The interpolation of the variables for the most

relevant CO₂ and ARS nodes revealed areas with a higher incidence of CO₂ and ARS influx. These areas were depicted with red-orange and orange-green colors at 8 points (M-25=713.49 ppm, M-26=630.89 ppm, M-27=597.64 ppm, M-13=693.69 ppm, M-15=683.24 ppm, and P-7=Casco Monumental, Plaza de Armas, and Plaza del Pino, P-10=Parque del Agua, P-11=Óvalo Ramón Castilla) in Fig. 4b. Future investigations will be aided by these zones that have been identified with higher incidences.

Finally, an analysis was also performed on a network involving both variables: 9 critical CO₂ points and 6 ARS points with an 8849m extension of the bike lane network, as shown in Fig. 4b.

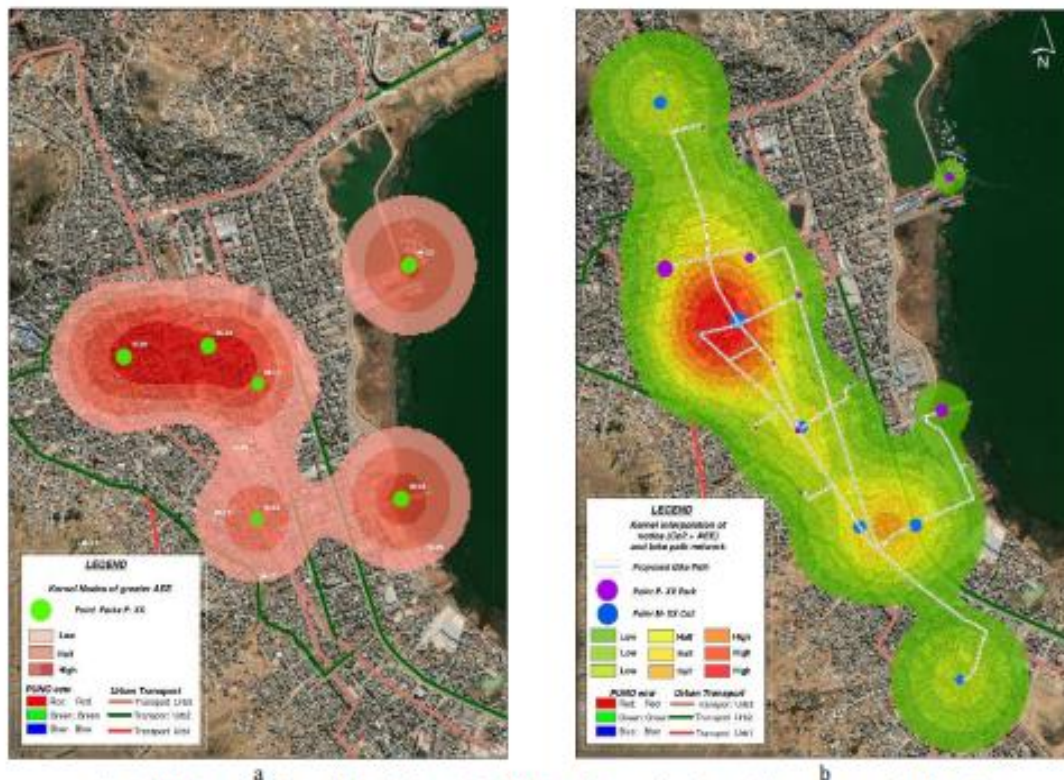


Fig. 4: (a) Map of nodes with the highest ARS, (b) Map of interpolated variables and network of roads

4. Conclusion

The modernization of the city of Puno has prompted rapid growth in the automotive fleet, turning it into the primary source of CO₂ emissions, a gas that contributes to global warming and environmental pollution. To tackle this challenge, we conducted a thorough monitoring of CO₂ and planned a network of bike lanes using Geographic Information Systems (GIS). The results reveal that CO₂ levels in Puno exceed the permissible limits, with a recorded concentration of 615.76 parts per million (ppm). We identified 9 critical CO₂ nodes and 6 nodes of higher density through Kernel density analysis.

We evaluated the relationship between these nodes using Network Analysis, resulting in a

network of bike lanes comprising 8,849 linear meters that connect critical CO₂ nodes with those of higher density. This node configuration generated resilient and autopoietic flows, supported by a robust CO₂ database.

Analyzing an article on emerging bike lanes in France and Colombia (Demoraes et al., 2024), it became evident that provisional bike lanes are disadvantageous for sustainable mobility, and they are commonly dismantled. Therefore, our research addresses deficiencies in the planning and zoning of the bike lane network through a detailed study of CO₂ and density, resulting in the creation of resilient bike lane networks. This study provides us with a solid foundation to continue exploring the optimization of the bike lane network and the application of CO₂ mitigation technologies, thus

contributing to the advancement of knowledge in the field of sustainable mobility and environmental management in urban settings.

Compliance with ethical standards

Conflict of interest

The author(s) declared no potential conflicts of interest with respect to the research, authorship, and/or publication of this article.

References

- Abreu LM, Da Hora HR, Rangel JJ, Erthal Jr M, Razmjoooy N, Estrela VV, Edoh TO, De Oliveira GG, and Iano Y (2020). A multi-criteria modelling for ranking CO₂ emitting G20 countries from the Kaya identity and their impacts on elderly health. In: Iano Y, Saotome O, Kemper G, Mendes de Seixas AC, and Gomes de Oliveira G (Eds.), Brazilian technology symposium: 477-487. Volume 233, Springer, Cham, Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75680-2_53
- Ballesteros HB and Aristizabal GL (2007). Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático. IDEA-METEO/008-2007, Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies-IDEAM, Bogotá, Colombia.
- Cordova CH, Portocarrero MN, Salas R, Torres R, Rodrigues PC, and López-Gonzales JL (2021). Air quality assessment and pollution forecasting using artificial neural networks in Metropolitan Lima-Peru. Scientific Reports, 11(1): 24232. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03650-9> **PMid:34930975** **PMCID:PMC8688545**
- Demoraes F, Ovtracht N, Tabaka K, Duché S, Mericskay B, and Sieper C (2024). The spatial dimension of "pop-up cycle paths" in metropolitan areas a comparative study of France and Colombia. In: Ortar N and Rérat P (Eds.), Cycling through the pandemic. The urban book series: 169-195. Springer International Publishing, Cham, Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-45308-3_8
- Guler D and Yomralioglu T (2021). Location evaluation of bicycle sharing system stations and cycling infrastructures with best worst method using GIS. The Professional Geographer, 73(3): 535-552. <https://doi.org/10.1080/00330124.2021.1883446>
- Hofmann DJ, Butler JH, Dlugokencky EJ, Elkins JW, Masarie K, Montzka SA, and Tans P (2006). The role of carbon dioxide in climate forcing from 1979 to 2004: Introduction of the annual greenhouse gas index. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 58(5): 614-619. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2006.00201.x>
- Leroutier M and Quirion P (2022). Air pollution and CO₂ from daily mobility: Who emits and Why? Evidence from Paris. Energy Economics, 109: 105941. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.105941>
- Luna RM, Soto GB, Oliden DS, and Padilla AB (2021). Bike-sharing management system using IoT. In: Iano Y, Arthur R, Saotome O, Kemper G, and França RP (Eds.), Proceedings of the 5th Brazilian technology symposium: 545-552. Springer International Publishing, Cham, Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57548-9_52
- Okabe A, Satoh T, and Sugihara K (2009). A kernel density estimation method for networks, its computational method and a GIS-based tool. International Journal of Geographical Information Science, 23(1): 7-32. <https://doi.org/10.1080/13658810802475491>
- Pachauri RK and Reisinger A (2007). Climate change 2007: Synthesis report: Contribution of working groups I, II and III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Geneva, Switzerland.
- Pinto FST, Fogliatto FS, and Qannari EM (2014). A method for panelists' consistency assessment in sensory evaluations based on the Cronbach's alpha coefficient. Food Quality and Preference, 32: 41-47. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2013.06.006>
- Pucher J and Dijkstra L (2003). Promoting safe walking and cycling to improve public health: Lessons from the Netherlands and Germany. American Journal of Public Health, 93(9): 1509-1516. <https://doi.org/10.2105/AJPH.93.9.1509> **PMid:12948971** **PMCID:PMC1448001**
- Semenzato P, Costa A, and Campagnaro T (2023). Accessibility to urban parks: Comparing GIS based measures in the city of Padova (Italy). Urban Forestry and Urban Greening, 82: 127896. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.127896>
- Subils MJB and Domínguez FB (2000). NTP 549: El dióxido de carbono en la evaluación de la calidad del aire interior. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales de España, Madrid, Spain.
- Venkatesan P (2016). WHO report: Air pollution is a major threat to health. The Lancet Respiratory Medicine, 4(5): 351. [https://doi.org/10.1016/S2213-2600\(16\)30014-5](https://doi.org/10.1016/S2213-2600(16)30014-5) **PMid:27012457**
- Weart S (2013). The discovery of global warming. Harvard University Press, Cambridge, USA.
- Yucra FR (2017). Determinación del nivel de contaminación de dióxido de carbono por parque automotor en la ciudad de Puno. Acceso Libre a Información Científica para la Innovación (ALICIA), San Isidro, Peru.



DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo LUZ CLARA CALISAYA ROSAS
identificado con DNI 71900620 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

ESCUELA PROFESIONAL DE ARQUITECTURA Y URBANISMO

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

" DISEÑO DE CICLOVIAS RESILIENTES EN PUNO, PERÚ:

COMBATIENDO LAS EMISIONES DE CO₂ URBANAS CON
ANÁLISIS SIG

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 12 de SEPTIEMBRE del 2024


FIRMA (obligatoria)



Huella



DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo JUAN NIBOL BRAVO INCUÑA
identificado con DNI 70207095 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado
ESCUELA PROFESIONAL DE ARQUITECTURA Y URBANISMO

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:
" DISEÑO DE CICLOVIAS RESILIENTES EN PUNO, PERÚ:
COMBATIENDO LAS EMISIONES DE CO₂ URBANAS CON
ANÁLISIS SIG. "

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 12 de setiembre del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella



AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo LUZ CLARA CALISAYA ROJAS
identificado con DNI 71400620 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

ESCUELA PROFESIONAL DE ARQUITECTURA Y URBANISMO

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

" DISEÑO DE CICLOVIA RESILIENTES EN PUNO, PERÚ

COMBATIENDO LAS EMISIONES DE CO₂ VERDES CON

ANÁLISIS SIG

para la obtención de Grado, Título Profesional o Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determine, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 12 de SEPTIEMBRE del 2024


FIRMA (obligatoria)



Huella



AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo JUAN NICHOL BRUNO INCHUÑA identificado con DNI 70207095 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

ESCUELA PROFESIONAL DE ARQUITECTURA Y URBANISMO

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

- DISEÑO DE CICLOVIAS RESILIENTES EN PUNO, PERÚ:
COMBATIENDO LAS EMISIONES DE CO₂ URBANAS CON
ANÁLISIS SIG

para la obtención de Grado, Título Profesional o Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 12 de Setiembre del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella